Universidade de Aveiro
2011

Departamento de Engenharia Civil

Ricardo Alexandre Mendes de Sousa

Ferramenta numérica para dimensionamento de filtros geotêxteis

Universidade de Aveiro
2011

Departamento de Engenharia Civil

Ricardo Alexandre Mendes de Sousa

Ferramenta numérica para dimensionamento de filtros geotêxteis

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica da Dra. Margarida João Fernandes de Pinho Lopes, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

o júri

presidente

Prof. Dr. Aníbal Guimarães da Costa
professor catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Profa. Dra. Maria Isabel Moita Pinto
professora auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Profa. Dra. Margarida João Fernandes de Pinho Lopes
professora auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Gostaria de agradecer à minha família, em especial aos meus pais, Maria e António, e ao meu irmão Marco, pelo apoio, incentivo e compreensão durante o período em que estive ausente.

À minha professora orientadora Margarida Pinho Lopes, pela dedicação e disponibilidade que prestou no desenvolvimento do meu trabalho, em especial pela sua compreensão e paciência perante as minhas dificuldades de linguagem.

À minha namorada Regina, pelo amor e devoção durante os momentos difíceis.

Às várias entidades do projecto de investigação que financiaram parte do trabalho realizado no âmbito do projecto FCT PTDC/ECM/099087/2008 e COMPETE, FCOMP-01-0124-FEDER-009724.

Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR

COMPETE
PROGRAMA OPERACIONAL FACTORES DE COMPETITIVIDADE

UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional

palavras-chave

filtros, dimensionamento, métodos, filtros granulares, filtros em geotêxtil, ferramenta numérica.

resumo

A presença de água em obras de engenharia civil é um problema constante, levando a uma necessidade de implementar filtros para controlar os sistemas de água e a sua mobilidade.
Em geral são utilizados dois tipos de filtros, os constituídos por material natural (granulares) e os constituídos por geossintéticos (geralmente são utilizados geotêxteis).
Neste trabalho desenvolveu-se uma ferramenta numérica para assistir o dimensionamento de filtros, tanto granulares como em geotêxtil.
Uma vez que o número de métodos existentes é elevado, torna-se difícil criar uma estratégia de dimensionamento para um filtro. Deste modo, na ferramenta numérica desenvolvida criou-se um critério de selecção, que, seguindo alguns parâmetros, inclui uma lista dos que apresentam maior utilidade para o projectista de um filtro. Assim, foi possível realizar uma análise dos métodos de dimensionamento de filtros e a sua evolução, com o fim de chegar ao objectivo principal de fazer um dimensionamento mais rigoroso destes elementos.
Note-se que a aplicação destes métodos através de cálculos manuais pode ser um processo demorado e com alguns riscos de má aplicação de equações e de cálculos. Para reduzir este tempo e o risco de erros, criou-se uma ferramenta numérica para dimensionar filtros granulares e geotêxteis que dá indicações ao utilizador sobre a validade das condições de aplicação dos métodos em causa.
A ferramenta numérica foi testada e validada recorrendo a exemplos da bibliografia, estando a funcionar bem e sendo uma boa ajuda ao projecto de filtros.

keywords filters, design, methods, granular filters, geotextile filters, numerical tool.

abstract

The presence of water in civil engineering works is a constant problem, this leads to the need of implementing filters to control the water systems and water mobility.
Generally two types of filters are used, those made of natural material (granular) and those consisting of geosynthetics (in general, geotextiles are used).
In this thesis, a numerical tool was developed to assist in the designing of filters, for both granular and with geotextiles.
Since there are many existing methods, it is difficult to create a strategy to design a filter. Thus, in the numerical tool, a selection criterion is created, which, following a few parameters, lead to the development of a list of more useful methods for the design of a filter. This way, it was possible to analyze the methods for designing filters and examine their evolution, in order to achieve the main objective of obtaining a more accurate filter design.
It is noted that the application of these methods by means of manual calculations can be a slow process with a risk of an incorrect use of equations and calculations. In order to reduce this time and risk of errors, the numerical tool was programmed to design granular and geotextile filters with the intent to indicate the user of the validity of the conditions of applying the methods in question.
The numerical tool was tested and validated using examples from the bibliography and is functioning well, becoming a useful aid for the project of filters.

ÍNDICE GERAL

Índice Geral I
Índice de Figuras III
Índice de Figuras em Anexo V
Índice de Quadros VII
Índice de Quadros em Anexo VIII
Simbologia e Acrónimos IX
1. Considerações Iniciais 1
1.1. Introdução 1
1.2. Funções 2
1.3. Aplicações 4
1.4. Motivação 5
2. Filtros 7
2.1. Evolução dos filtros 7
2.2. Historial 8
2.3. Problemas associados 12
2.4. Ensaios e métodos de ensaio 14
2.4.1. Introdução 14
2.4.2. Filtros granulares 15
2.4.3. Filtros geotêxteis 18
3. Dimensionamento de Filtros 27
3.1. Filtros granulares 27
3.1.1. Propriedades 27
3.1.2. Dimensionamento 29
3.2. Filtros geotêxteis 33
3.2.1. Propriedades 33
3.2.2. Dimensionamento 35
3.3. Síntese dos critérios de dimensionamento 44
3.4. Filtros granulares *versus* filtros geotêxteis 44
4. Selecção de Métodos e Filtros 47
4.1. Métodos de dimensionamento 47
4.2. Critério de selecção 47

4.3. Métodos para filtros granulares 49
4.3.1. Terzaghi 49
4.3.2. Bertram 50
4.3.3. US Waterways Experiment Station 50
4.3.4. US Bureau of Reclamation 51
4.3.5. Sherard *et al.* 52
4.3.6. Geotechnical Engineering Office of Hong Kong 53
4.3.7. Giroud 54
4.4. Métodos para filtros geotêxteis 55
4.4.1. German Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (GSSMFE) 55
4.4.2. French Committee on Geotextiles and Geomembranes (FCGG) 56
4.4.3. Federal Highway Administration 59
4.4.4. Mlynarek 62
4.4.5. Giroud 64
4.5. Considerações finais 68
5. Ferramenta Numérica de Dimensionamento de Filtros 71
5.1. Objectivos 71
5.2. Funcionamento 71
5.2.1. Introdução de dados 73
5.2.2. Tratamento de dados 80
5.2.3. Procedimento de cálculos 83
5.2.4. Tratamento dos resultados finais 86
5.3. Análise de dados e resultados 88
5.3.1. Observações 88
5.3.2. Comparação dos resultados entre métodos 89
5.3.3. Validação dos métodos 96
5.3.4. Situações reais 99
6. Considerações Finais 101
6.1. Implementação 101
6.2. Ferramenta Numérica 102
6.3. Objectividade 103
7. Conclusões 105
8. Desenvolvimentos Futuros 107
Referências Bibliográficas 109
ANEXO 117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Funções dos geossintéticos: a) filtragem; b) separação; c) drenagem; d) protecção; e) reforço; f) barreira dos fluidos; g) controlo de erosão. 2
Figura 2. Representação esquemática da função de filtragem [Fibertex (2006b)]. 3
Figura 3. Aplicações de filtros: a) costas; b) portos; c) aterros e taludes; d) pavimentos; e) vias-férreas; f) sistemas de drenagem; g) barragens; h) rios, canais, reservatórios, lagos; i) aterros sanitários; j) lagos. [Fibertex (2006a)]. 5
Figura 4. Tipos de filtros (num sistema de drenagem): a) granulares; b) geotêxtil; c) misto 7
Figura 5. Cronologia do desenvolvimento de métodos para filtros granulares e em geotêxtil. 11
Figura 6. Colmatação de filtros [Muñoz (2005)]: a) cegamento; b) bloqueamento; c) colmatação interna. 13
Figura 7. Fenómenos de: a) levantamento; b) "flapping" [Moraci e Mandaglio (2008)]. 13
Figura 8. Sequência ideal para o dimensionamento de um filtro e de avaliação da sua fiabilidade. 15
Figura 9. Aparelho de NEF [Yasrobi e Azad (2004a)]. 16
Figura 10. Aparelho de CEF [Yasrobi e Azad (2004a)]. 17
Figura 11. Ensaio para determinar espessura Pinho-Lopes (2009c). 18
Figura 12. Exemplo de equipamento de peneiração por via húmida [Pinho-Lopes (2009c)]. . 19
Figura 13. Exemplo do equipamento típico para avaliar a permeabilidade do geotêxtil plano [Pinho-Lopes (2009c)]. 20
Figura 14. Aparelho de fluxo bidireccional [Zhao *et al.* (2000)]. 20
Figura 15. Aparelho para a medição da razão gradiente, adaptado de Pinho-Lopes (2009b). 21
Figura 16. Ensaio de punçoamento dinâmico [Pinho-Lopes (2009c)]. 21
Figura 17. Ensaio de punçoamento estático Pinho-Lopes (2009c). 22
Figura 18. Ensaio de permissividade [Vidal (2009)]. 23
Figura 19. Ensaio de simulação de DDI Pinho-Lopes (2009c). 24
Figura 20. Equipamento para medir resistência à tracção de geossintéticos confinados em solo [Martins (2000)]. 24
Figura 21. Ensaios de tracção: a) concentrado ("grab test"); b) distribuído (em bandas estreitas); c) distribuído (em bandas largas) [Vidal (2009)]. 25
Figura 22. Ensaio laboratorial para a simulação de queda de blocos e de material rochoso Pinho-Lopes e Lopes (2010). 26
Figura 23. Ensaio laboratorial de queda de pirâmide Pinho-Lopes e Lopes (2010). 26
Figura 24. Recta representativa do coeficiente de uniformidade linear [Giroud (2010)]. 30
Figura 25. Avaliação da estabilidade interna [Pinho-Lopes (2009b)]. 33
Figura 26. Critério de retenção do solo para condições hidráulicas estáticas [Mirafi (2010)]. 38
Figura 27. Critério de retenção do solo para condições hidráulicas dinâmicas [Mirafi (2010)]. 39
Figura 28. Critério de espessura: a) constrição, b) passagem de partículas [Giroud (2010)]. . 41
Figura 29. Critério de selecção de filtro [Lafleur (1999) citado por Pinho-Lopes (2009b)]..... 42
Figura 30. Hierarquia dos parâmetros do critério de selecção utilizadas. 48
Figura 31. Representação esquemática dos solos. a) $C_u \leq 3$; b) $C_u \geq 3$ [Giroud (2010)]. 54

Figura 32. Fluxograma para verificação do critério de retenção do método do GSSMFE..... 56
Figura 33. Fluxograma para implementação do critério de retenção do método do FCGG. .. 59
Figura 34. Fluxograma para implementação do critério de permeabilidade do método do FCGG..... 59
Figura 35. Processo de dimensionamento para o método do FHWA. 62
Figura 36. Processo de selecção de um filtro geotêxtil [adoptado de Mlynarek (1998b)]..... 63
Figura 37. Pressão de água nos poros: a) sem o filtro; b) com o filtro, mas sem o i_S; c) com o filtro, mas cumprindo o critério [Giroud (2010)]. 65
Figura 38. Processo de dimensionamento do método Giroud. 67
Figura 39. Processo de verificação do método Giroud (2010). 67
Figura 40. Processo de funcionamento da ferramenta numérica. 72
Figura 41. Exemplo de uma janela típica de introdução de dados. 74
Figura 42. Exemplo de uma janela com opções adicionais, "Selecção de Métodos de Dimensionamento". 75
Figura 43. Exemplo de avisos de erros numa janela de preenchimento. 76
Figura 44. Exemplo de mensagens de erros graves numa janela de preenchimento. 77
Figura 45. Exemplo de uma mensagem de um erro ligeiro numa janela de preenchimento. 77
Figura 46. Folha Excel de "ERROS". 78
Figura 47. Botão que permite saltar para a folha de "ERROS". 79
Figura 48. Folha Excel de "DADOS". 80
Figura 49. Filtragem de dados para o funcionamento da folha Excel "DADOSGRF". 81
Figura 50. Exemplo de janela 6 da folha Excel "Preenchimento". 82
Figura 51. Exemplo de janela 7 da folha Excel "Preenchimento". 82
Figura 52. Exemplo da interpretação da folha "DADOS". 82
Figura 53. Apresentação da folha Excel "PC Granular". 84
Figura 54. Apresentação da folha Excel "PC Geotêxtil". 85
Figura 55. Folha de dados do Exercício 5.3.2. 90
Figura 56. Folha 1 dos resultados do filtro granular para Exercício 5.3.2. 91
Figura 57. Folha 1 dos resultados para um filtro em geotêxtil do Exercício 5.3.2. 92
Figura 58. Resultados obtidos pela ferramenta numérica do Exercício FHWA. 97
Figura 59. Resultados de geotêxtil para Exemplo 2 de Mlynarek (1998b). 98
Figura 60. Processo de desenvolvimento de um filtro 101
Figura 61. Processo de utilização da ferramenta numérica. 102
Figura 62. Gráfico de desempenho da ferramenta numérica. 103

ÍNDICE DE FIGURAS EM ANEXO

Figura A - 1. Critério de selecção para um filtro de geotêxtil em condições de fluxo bidireccional (retenção e colmatação) Mlynarek (1998b). 118
Figura A - 2. Critério de selecção para um filtro de geotêxtil em condições de fluxo unidireccional (retenção e colmatação) Mlynarek (1998b). 119
Figura A - 3. Exemplo de um envelope de solos problemáticos segundo Heerten (1986) e adaptado por G.E.O.H.K. (1993). 132
Figura A - 4. Folha 1 de dados do exemplo de Mlynarek. 143
Figura A - 5. Folha 2 de dados do Exemplo 2 de Mlynarek (1998b). 144
Figura A - 6. Folha 1 de dados relativo ao Exercício de F.H.W.A. (1998). 147
Figura A - 7. Folha 2 de “Resultados Geotêxtil”. Exigências de resistência. 148
Figura A - 8. Folha 3 de “Resultados Geotêxtil”, Factores de Redução. 149

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1. Aplicações de filtros adaptado de Pinho-Lopes e Lopes (2010). 4
Quadro 2. Métodos para filtros granulares e as respectivas dimensões das partículas. 8
Quadro 3. Parâmetros efectivos um filtro granular [Yasrobi e Azad, (2004b)]. 28
Quadro 4. Critério de retenção [U.S.C.E. (1953)]. 30
Quadro 5. Dimensão característica de abertura de filtros granulares [Giroud (2010)]. 32
Quadro 6. Critério de Sobrevivência [Fannin (2004)]. 43
Quadro 7. Critério de estabilidade química e térmica de polímeros [adaptado de G.E.O.H.K. (1993)]. 43
Quadro 8. Semelhanças e Diferenças Pinho-Lopes (2009b). 45
Quadro 9. Listagem dos métodos escolhidos. 49
Quadro 10. Valores dos coeficientes e as respectivas condições de aplicação. 57
Quadro 11. Critério de retenção do FHWA, adaptado de Muñoz (2005). 60
Quadro 12. Quadro geral de representação de caminhos de selecção no método de Mlynarek. 63
Quadro 13. Valores de C para o critério de permeabilidade do método de Mlynarek. 64
Quadro 14. Valores de gradiente hidráulico (i_S) 65
Quadro 15. Aplicabilidade e limitações dos métodos de dimensionamento para filtros granulares considerandos na ferramenta numérica. 69
Quadro 16. Aplicabilidade e limitações dos métodos de dimensionamento para filtros geotêxteis considerados na ferramenta numérica. 70
Quadro 17. Listagem de folhas Excel da ferramenta numérica e as respectivas funções. 73
Quadro 18. Listagem das folhas Excel da ferramenta numérica e os respectivos procedimentos relativos à fase de introdução dos dados. 74
Quadro 19. Grau, tipo e significado de erros listados na ferramenta numérica. 76
Quadro 20. Exemplificação de fórmulas Excel de interpretação para condições hidráulicas em "DADOS". 83
Quadro 21. Exemplificação de fórmulas Excel dos códigos para condições hidráulicas em "DADOS". 83
Quadro 22. Valores máximos, mínimos e médios dos resultados granulares do Exercício 5.3.2 93
Quadro 23. Valores percentuais do desvio da média para resultados granulares. 94
Quadro 24. Percentagem dos Acumulados Passados, exemplo de F.H.W.A. (1998). 97
Quadro 25. Dados do exemplo em Giroud (2010). 99

ÍNDICE DE QUADROS EM ANEXO

Quadro A - 1. Caminhos possíveis do fluxograma. Fluxo bidireccional Mlynarek (1998a). .. 120
Quadro A - 2. Caminhos possíveis do fluxograma. Fluxo unidireccional [Mlynarek (1998a)]. 122
Quadro A - 3. Normas de ensaios para propriedades principais. 130
Quadro A - 4. Normas de ensaios para propriedades secundárias. 131
Quadro A - 5. Critérios de dimensionamento para filtro granulares. 133
Quadro A - 6. Critério de filtro dado por GSSMFE (1986). 134
Quadro A - 7. Critério de filtro dado por FCGG (1989). 135
Quadro A - 8. Critério de filtro dado por FHWA (1998). 136
Quadro A - 9. Critério de filtro para fluxo unidireccional dado por Mlynarek (1998). 137
Quadro A - 10. Critério de filtro para fluxo bidireccional dado por Mlynarek (1998). 138
Quadro A - 11. Critério de dimensionamento de filtro dado por Giroud (2010). 139
Quadro A - 12. Critério de verificação de um filtro dado por Giroud (2010). 140
Quadro A - 13. Exemplo 1 de Mlynarek (1998b). 141
Quadro A - 14. Exemplo 2 de Mlynarek (1998b). 141
Quadro A - 15. Exemplo 3 de Mlynarek (1998b). 142
Quadro A - 16. Exemplo 4 de Mlynarek (1998b). 142
Quadro A - 17. Critério de Sobrevivência de um filtro em geotêxtil segundo F.H.W.A. (1998). 145
Quadro A - 18. Valores máximos, mínimos e médios dos resultados geotêxtil do Exercício 5.3.2..... 146
Quadro A - 19. Valores percentuais do desvio da média para resultados geotêxtil. 146

SIMBOLOGIA E ACRÓNIMOS

A_{GTX}	=	Coeficiente dimensional para a permeabilidade do geotêxtil	
AOS	=	Abertura aparente do geotêxtil	mm
A_R	=	Relativa área aberta (área aberta/área total)	
ASSHTO	=	"American Association of State Highway and Transportation Officials"	
ASTM	=	"American Society for Testing and Materials"	
C	=	Constante empírica	
CBR	=	Grau de sobreconsolidação	
CEF	=	Ensaio de filtro de erosão contínua	
CEN	=	Comissão Europeia de Normalização	
Cg	=	Coeficiente dimensional para a retenção do geotêxtil	
C_u	=	Coeficiente de uniformidade	
D	=	Dispersão do solo	%
DDI	=	Danificação Durante Instalação	
d_f	=	Diâmetro da fibra do geotêxtil	mm
DHR	=	"Double-hydrometer ratio" do solo	
D_m	=	Dimensão das partículas correspondentes a m% de passados do filtro	mm
d_m	=	Dimensão das partículas correspondentes a m% de passados do solo base	mm
d_m'	=	Dimensão das partículas correspondentes a m% de passados da areia fina	mm
d'_m	=	Dimensão uniforme das partículas correspondentes a m% de passados do solo base	mm
D_w	=	Dimensão de abertura obtido por peneiração (molhado)	mm
e	=	Índice de vazios natural do solo	

e_{max}	=	Índice de vazios máximo do solo	
e_{min}	=	Índice de vazios mínimo do solo	
EN	=	Norma Europeia	
ENV	=	Pré-norma Europeia	
FCGG	=	French Comittee on Geotextiles and Geomembranes	
FHWA	=	Federal Highway Administration	
FR_{DB}	=	Factor Redução danificação biológica	
FR_{DDI}	=	Factor Redução danificação durante instalação	
FR_{DQ}	=	Factor Redução danificação química	
FR_{FLU}	=	Factor Redução fluência	
GEO	=	"Geotechnical Engineering Office"	
GEOHK	=	Geotechnical Engineering Office of Hong Kong	
GR	=	"Gradient Ratio" Razão Gradiente	
h_c	=	Altura de ascensão capilar	mm
I_D	=	Índice de compacidade	%
IGS	=	Sociedade Internacional de Geossintéticos	
I_P	=	Índice de plasticidade	
i_S	=	Gradiente hidráulico do solo	
ISO	=	Organização Internacional de Normalização	
k_f	=	Coeficiente de permeabilidade do filtro	m/s
k_{GTX}	=	Coeficiente de permeabilidade do geotêxtil	m/s
k_n	=	Coeficiente de permeabilidade do normal ao plano	m/s
k_S	=	Coeficiente de permeabilidade do solo base	m/s
n	=	Porosidade	%

$N_{constrições}$	=	Número de constrições do geotêxtil	
NEF	=	Ensaio de filtro não erosivo	
N_o	=	Número de aberturas por unidade de área	
N_{omin}	=	Número mínimo de aberturas por unidade de área	
O_e	=	Dimensão efectiva da abertura do geossintético	mm
O_f	=	Dimensão de abertura do filtro	mm
O_{GTX}	=	Dimensão de abertura do geotêxtil	mm
R_R	=	Razão de retenção	
T_{adm}	=	Resistência á tracção admissível	N
t_{GTX}	=	Espessura do geotêxtil	mm
T_{ult}	=	Resistência á tracção admissível	N
μ	=	Viscosidade de água	m^2/s
μ_{GTX}	=	Massa por unidade de área do geotêxtil	g/m^2
USBR	=	US Bureau of Reclamation	
USCE	=	US Waterways Experiment Station	
W_P	=	Limite de plasticidade	%
W_L	=	Limite de liquidez	%
ρ_f	=	Densidade do material do geotêxtil	kg/m^3
ψ	=	Permissividade do geotêxtil	s^{-1}

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. Introdução

A presença de água em obras de engenharia civil é um problema constante para os engenheiros, de onde vem a necessidade de controlar os sistemas de água e da sua mobilidade. Uma forma de resolver parte deste problema é através do uso de filtros, os primeiros usando material natural e mais recentemente, com geossintéticos [Mlynarek (2000)].

De acordo com a Sociedade Internacional de Geossintéticos (IGS), um geossintético é um material polimérico, natural ou sintético, usado em contacto com materiais naturais, como solo ou rocha, ou qualquer outro material geotécnico utilizado em aplicações de engenharia civil [Pinho-Lopes e Lopes (2010)].

Os geossintéticos podem ser classificados em categorias dependendo do processo de fabrico. Um dos tipos de geossintéticos mais comuns é o geotêxtil que são mantas contínuas de fibras ou filamentos, tecidos, não tecidos, tricotados ou costurados. Os geotêxteis são flexíveis e permeáveis [Bathrust (1996)].

Há mais de meio século que são utilizados geossintéticos em obras de engenharia civil, mas nos últimos trinta anos é que tem ocorrido uma grande procura e utilização destes materiais [Artieres e Tcherniavsky (2002)]. Este aumento de procura surgiu visto que se têm verificado cada vez mais casos de sucesso, maior realismo nos critérios e métodos de dimensionamento [Giroud (2005)] e, sobretudo, devido às enormes vantagens que estes materiais trazem à obra [Mlynarek (1998b)]. Os geossintéticos são materiais com baixo custo de produção, apresentam uma grande facilidade de aplicação e demonstram uma boa eficácia no desempenho das suas funções quando são correctamente dimensionados e utilizados. No entanto, em Portugal ainda existe uma falta de formação e conhecimento sobre estes materiais conduzindo, em muitos casos, a um mau dimensionamento e, por sua vez, a uma má aplicação, não aproveitando assim todos os benefícios do uso de geossintéticos.

1.2. Funções

Os geossintéticos podem ser utilizados em quase todos os tipos de obras em engenharia civil dependendo da sua função e do que se pretende. A Comissão Europeia de Normalização (CEN) e a Comissão Técnica (TC 189), desenvolveram a norma EN ISO 10318 [C.E.N. (2005b)] que faz uma abordagem das principais funções e aplicações dos geossintéticos. No documento I.G.S. (2009) é feita uma descrição das funções.

A filtragem é a utilização do geossintético para a retenção do solo ou de outras partículas sujeitas a forças hidrodinâmicas, permitindo a passagem de fluidos.

A separação é a utilização da capacidade de resistência à tracção do geossintético para melhorar as propriedades mecânicas do solo ou de outros materiais de construção.

A drenagem é a utilização do geossintético para recolha e transporte de fluidos.

A protecção é a utilização do geossintético para evitar ou reduzir danos locais de uma outra superfície ou camada.

O reforço é a utilização da capacidade de resistência à tracção do geossintético para melhorar as propriedades mecânicas do solo ou de outros materiais de construção.

A função de barreira de fluidos consiste na utilização do geossintético para limitar a migração de fluidos ou gases.

O controlo de erosão superficial é a utilização do geossintético para prevenção ou limitação do movimento do solo ou outras partículas à superfície, por acção da água da chuva e/ou do vento.

A Figura 1 ilustra de forma esquemática a simbologia dos diferentes tipos de funções que um geossintético pode desempenhar.

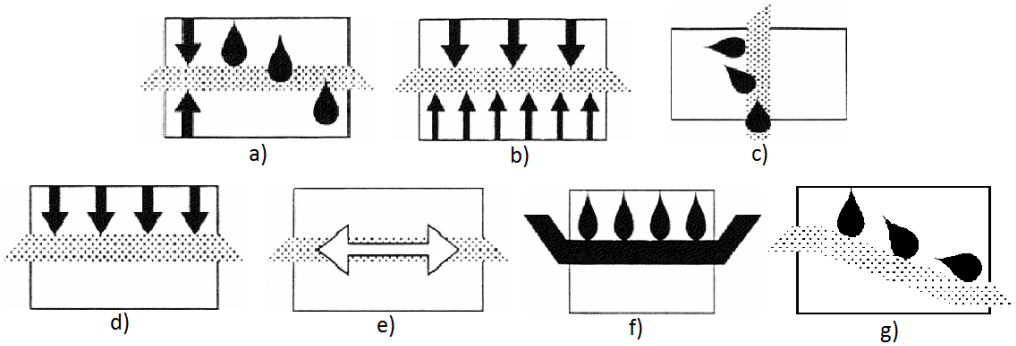


Figura 1. Funções dos geossintéticos: a) filtragem; b) separação; c) drenagem; d) protecção; e) reforço; f) barreira dos fluidos; g) controlo de erosão.

Quando os geossintéticos são aplicados, podem desempenhar estas funções individualmente ou em conjunto. Por exemplo, os geossintéticos em aplicações hidráulicas devem desempenhar as seguintes funções: separação, filtragem, drenagem e barreira dos fluidos [Heibaum *et al.* (2006)].

A filtragem, como mencionado, é um fenómeno complexo que consiste em reter o solo ou outras partículas sujeitas a forças hidrodinâmicas, enquanto permite a passagem de fluidos para o interior ou através de um geotêxtil ou produto relacionado [Foubert (2009)]. Então, quando se dimensiona um filtro para uma obra, deve-se dimensionar de modo a garantir um bom desempenho desta função, ou seja, a permitir a passagem de líquidos, nomeadamente a água, e a retenção de partículas sólidas, o solo, mas ao mesmo tempo garantir que estes não impedem esta passagem através de fenómenos como a colmatação.

Segundo Giroud (2006) a filtragem pretende prevenir a instabilidade do solo sujeito a forças hidrodinâmicas e ao mesmo tempo mobilizar uma baixa resistência passiva ao fluxo de água. De acordo com Moraci e Mandaglio (2008), para projectar um filtro adequado para desempenhar as funções pretendidas, é necessário ter conhecimento sobre a interacção solo-filtro.

Na Figura 2 está esquematicamente representada a função de filtragem. De acordo com Fibertex (2006b), as correctas propriedades do geotêxtil garantem a retenção das partículas finas e mantêm o fluxo de agua.

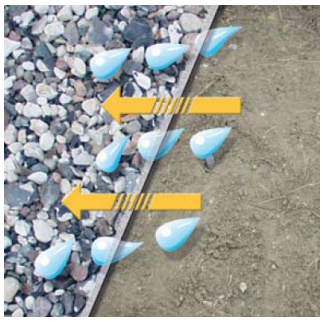


Figura 2. Representação esquemática da função de filtragem [Fibertex (2006b)].

1.3. Aplicações

Os geossintéticos podem ser aplicados em praticamente todos os tipos de obras em engenharia civil. De acordo com as principais aplicações de geossintéticos referidas na EN ISO 10318 [C.E.N. (2005b)], a função de filtragem atinge uma grande parte das aplicações, estas são [Pinho-Lopes e Lopes (2010)]:

1. Obras marítimas.
2. Vias de comunicação.
3. Obras hidráulicas.
4. Obras de engenharia ambiental.

Por vezes a filtragem está associada a outras funções, dependendo do domínio de utilização e do tipo de geossintético. Em geral, os filtros em geossintético são constituídos por geotêxteis. No Quadro 1 estão referidas as principais aplicações de filtros em diferentes tipos de obras.

Quadro 1. Aplicações de filtros adaptado de Pinho-Lopes e Lopes (2010).

Tipo de obra	Aplicação	Descrição
Marítimas	Costas. Portos	No âmbito de protecção da costa no qual o filtro situa-se ente os solos naturais e enrocamento de protecção.
Vias de comunicação	Aterros	São utilizados filtros na base de aterros e os solos saturados de fundação e em sistemas de drenagem.
	Estabilização e protecção de taludes	O filtro encontra-se entre os solos do aterro e dispositivos de protecção de taludes.
	Pavimentos sobre solos moles	Filtragem e drenagem dos solos saturados da base.
	Vias-férreas	Filtros em sistemas de drenagem.
	Túneis	
	Drenagem	
Hidráulicas	Barragens de terra	Filtros em sistemas de drenagem nomeadamente envolvendo drenos da brita.
	Rios. Canais. Reservatórios. Lagos	Filtro entre o solo natural das margens e o enrocamento superior de protecção.
Engenharia ambiental	Aterros Sanitários	Filtros em sistemas de drenagem
	Lagos	Filtros em sistemas de protecção das margens.

Na Figura 3 estão ilustradas de forma esquemática algumas das aplicações de filtros em geossintéticos.

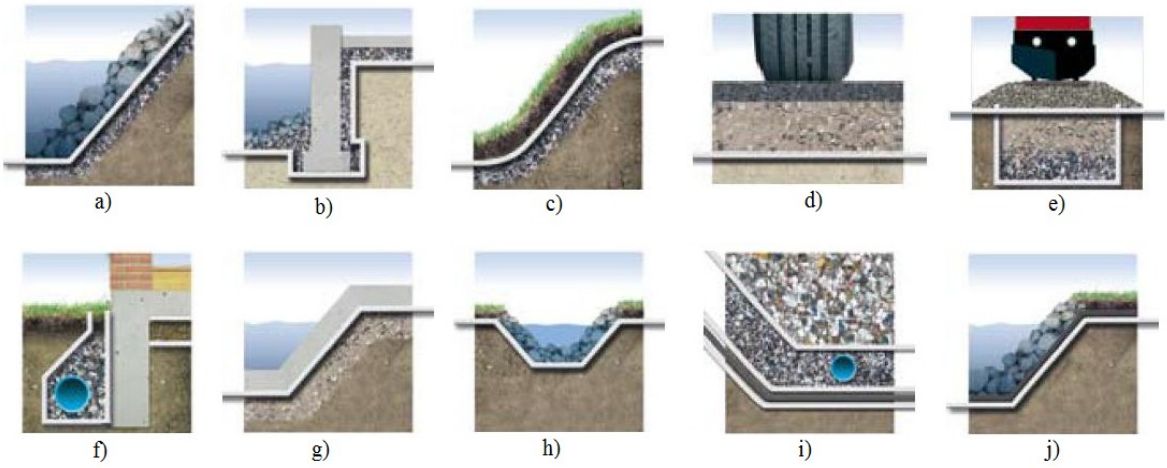


Figura 3. Aplicações de filtros: a) costas; b) portos; c) aterros e taludes; d) pavimentos; e) vias-férreas; f) sistemas de drenagem; g) barragens; h) rios, canais, reservatórios, lagos; i) aterros sanitários; j) lagos. [Fibertex (2006a)].

1.4. Motivação

Existe um número elevado de métodos, o que torna difícil conceber uma estratégia de dimensionamento para um filtro. Será verificado neste trabalho que ao longo do último século, os métodos de dimensionamento estão em constante modificações, diferindo de caso para caso. Apesar de serem baseados nos princípios do Terzaghi, segundo Giroud (2005) "Não se deve fazer hoje o que Terzaghi faria há 50 anos. Deve-se fazer hoje o que Terzaghi faria hoje". É nestas palavras que se baseia este trabalho, com o objectivo de criar uma ferramenta numérica para o dimensionamento de filtros granulares ou em geotêxtil para dar apoio a projectistas e às obras onde estes materiais se incluem.

2. FILTROS

2.1. Evolução dos filtros

O uso de filtros em obras de engenharia civil veio com a necessidade de controlar a presença de água. Os primeiros filtros foram realizados utilizando materiais naturais, nomeadamente solos granulares. Um engenheiro austríaco chamado Karl von Terzaghi foi dos primeiros protagonistas a estudar cientificamente esta solução. Desde então, os primeiros estudos e critérios de dimensionamento para filtros têm vindo a evoluir. A solução tradicional de filtros granulares tem vindo progressivamente a ser substituída pela utilização de filtros geotêxteis. Hoje em dia o uso de geotêxteis como filtros é usual, devido às várias vantagens que apresentam relativamente aos filtros granulares. No entanto, por vezes é utilizada uma solução mista, ou seja, empregar um geotêxtil com material granular, assim aproveitando as vantagens que ambos oferecem.

Na Figura 4 está representada a utilização de filtros granulares, geotêxteis e mistos.

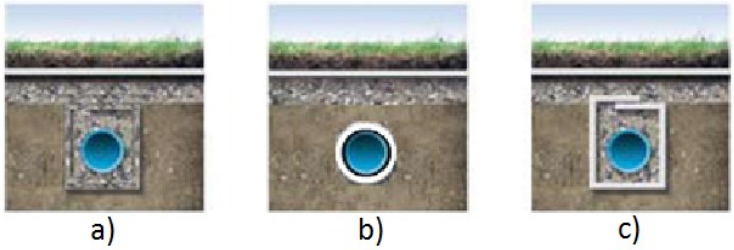


Figura 4. Tipos de filtros (num sistema de drenagem): a) granulares; b) geotêxtil; c) misto [Fibertex (2006a)].

Assim, a solução tradicional de filtros consiste em utilizar material granular de modo a controlar a presença da água nas estruturas. Karl Terzaghi foi o primeiro a implementar e desenvolver este conceito em sistemas de drenagem [Mlynarek (2000)]. Estes primeiros estudos, em 1922, apontaram uma relação entre as dimensões de partículas correspondentes à percentagem m de passados do filtro, D_m, e à percentagem m de passados do solo a proteger, d_m, [Giroud (2010)]. Além disso, a importância do fluxo de água num sistema de filtragem foi avaliada, tendo sido definida uma relação entre o coeficiente de permeabilidade do solo base (k_S) e a porosidade (n) e D_m.

No documento G.E.O.H.K. (1993) é feita uma revisão (até a data do documento) da evolução dos métodos de dimensionamento de filtros, quer granulares, quer geotêxteis.

2.2. Historial

No que se refere a filtros granulares, os métodos de dimensionamento recorrem as relações entre D_m e à d_m. Dependendo dos métodos, estas percentagens podem variar, como demonstra o Quadro 2. Este quadro apresenta alguns métodos de dimensionamento e as respectivas dimensões que são utilizadas.

Quadro 2. Métodos para filtros granulares e as respectivas dimensões das partículas.

Método	Dimensão do Solo Base	Dimensão de Material do Filtro
Terzaghi (1922) Bertram (1940) G.E.O.H.K. (1993) Giroud (2010)	d_{15}; d_{85}	D_{15}
Newton e Hurley (1940)	d_{15}; d_{50}	D_{15}
U.S.C.E. (1953)	d_{15}; d_{50}; d_{85};	D_{15}
U.S.B.R. (1955)	d_{15}; d_{50}	D_{15}; D_{50}; D_{100}
Sherard *et al.* (1984a)	d_{85}	D_{15}
Honjo e Veneziano (1989)	d_{75}; d_{85}	D_{15}; D_{95}

Wittman (1979) desenvolveu um método complexo para calcular a área média dos poros do filtro granular com base na hipótese de os poros serem representados por secções planas. Wittman (1979) e Silveira (1965) utilizaram métodos teóricos para avaliar a importância da espessura mínima para o desempenho de um filtro granular. No método de dimensionamento apresentado por G.E.O. (1993), a determinação da espessura do filtro é mais simples, já que recorre à lei de Darcy.

Autores como Kenney *et al.* (1985) investigaram com profundidade o conceito de constrição. Num filtro granular, a constrição define-se como o espaço vazio entre as partículas do filtro. Logo, este estudo sugeriu que a capacidade de filtragem de um solo granular depende do espaço de constrição em vez de espaço de vazios, daí a importância da espessura de um filtro [G.E.O.H.K. (1993)]. As investigações realizadas por Kenney *et al.* (1985) também incidiram sobre a determinação do coeficiente de permeabilidade do solo

(k_S) através de fórmulas mais simplificadas, em vez de expressões complexas como as propostas por Kozeny (1927) e Rose (1950), que utilizam a viscosidade de água (μ).

Quanto à avaliação da estabilidade interna, autores como U.S.C.E. (1953), Milligan (1986), Sherard e Dunnigan (1986) e Wolski (1987) consideraram o coeficiente de uniformidade (C_u) o parâmetro principal. No entanto, Scheurenberg (1986) e Kenney e Lau (1986) relacionam essa estabilidade com a forma e angulosidade das partículas, bem como com a distribuição granulométrica do agregado.

O uso de geotêxteis como filtros iniciou uma nova era de investigação. De facto, existe um número elevado de estudos realizados sobre geotêxteis, desde as primeiras experiencias realizadas por Calhoun (1972) até ao presente. Salienta-se que muitos métodos de dimensionamento para filtros geotêxteis têm como base os métodos dos filtros granulares.

Em muitos dos métodos, relaciona-se a dimensão característica das aberturas do geossintético (O_{95} ou O_{90}) e o diâmetro das partículas mais finas do solo base, em substituição da dimensão de agregado do filtro granular. Alguns métodos recorrem a outra propriedade do geossintético: Heerten (1982) e F.C.G.G (1984), utilizam a dimensão efectiva da abertura do geossintético (O_e) e a dimensão da abertura de filtragem (O_f), respectivamente.

A avaliação da dimensão das aberturas de um geotêxtil, em particular da dimensão característica, pode ser feita através de ensaios em que o geotêxtil funciona como um peneiro; posteriormente o material granular que atravessa o geotêxtil é analisado. Autores como Faure *et al.* (1986) efectuaram um dos estudos mais valiosos sobre este parâmetro através de cinco métodos diferentes: peneiração usando esferas de vidro; peneiração com diferentes granulometrias de areias; peneiração com areias bem graduadas de diferentes dimensões; usando a constrição; e usando a espessura do geotêxtil [G.E.O.H.K. (1993)].

Uma grande parte das investigações relaciona os coeficientes de permeabilidades do geotêxtil e do solo, k_{GTX} e k_S respectivamente, de modo a diminuir a perturbação do movimento de água [Pinho-Lopes (2009a)]. Giroud (1981) faz uma análise detalhada sobre estes coeficientes. Por sua vez, os critérios do Mlynarek (1998b) baseiam-se na direcção do fluxo de água. A norma do "German Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering", GSSMFE (1986), baseia-se em estudos realizados na costa marítima, assim o seu dimensionamento refere-se às condições hidráulicas bastante graves, e consequentemente

quando aplicado em casos normais, resulta num filtro sobredimensionado, ao contrario do que acontece seguindo os critérios do F.H.W.A. (1998).

De acordo com Kenney *et al.* (1985), uma partícula do solo deve passar no filtro através dos vazios, chamados contrições. Segundo Giroud (2010), é necessário implementar um critério adicional de verificação da espessura de um geotêxtil (t_{GTX}) não tecido, de modo a garantir o número mínimo de constrições necessário, ou seja, a abertura aparente dum filtro em geotêxtil não tecido depende da espessura.

Relativamente à durabilidade de um filtro em geotêxtil, a A.S.T.M. (1997) implementou um conjunto de critérios de sobrevivência que o geossintético deve cumprir para desempenhar uma dada função. Ainda, de modo a garantir esta exigência, Mirafi (2010) dá importância de um bom plano de execução em obra. Os factores que podem danificar o geotêxtil após a sua instalação podem ser ataques químicos, ataques biológicos, exposição aos agentes atmosféricos e variações de temperatura.

Em relação aos ataques químicos, segundo investigações realizadas por Calhoun (1972), F.C.G.G (1989), Troost e Hoedt (1984), Halse *et al.* (1987a) e Halse *et al.* (1987b), verifica-se que, em geral, as fibras dos polímeros são resistentes, com excepção em situações extremamente agressivas. Carneiro *et al.* (2006a) estudaram a importância de incorporar aditivos químicos nos geotêxteis de polipropileno.

Alguns estudos concluíram que, em geral, os geossintéticos resistem bem aos microrganismos [Rankilor (1981)]. No entanto, alguns microrganismos podem danificar os geossintéticos cuja os polímeros não sejam completamente sintéticos [Rodriguez (1985) e Zanten (1986)].

Na maioria das investigações, concluiu-se que existe uma perda de resistência do geossintético quando este é exposto aos agentes atmosféricos por uma longa duração [Carneiro *et al.* (2006b)]. O mesmo se verifica com temperaturas muito variadas ou extremas. No caso de filtros, por norma estes encontram-se confinados em solo, portanto o seu desempenho não é muito afectado por estes factores. No entanto, no caso de situações invulgares, ou seja, onde o filtro será mesmo sujeito a condições extremas, deve-se fazer estudos e investigações mais elaboradas.

A Figura 5 apresenta uma cronologia de eventos que levaram ao desenvolvimento de filtros.

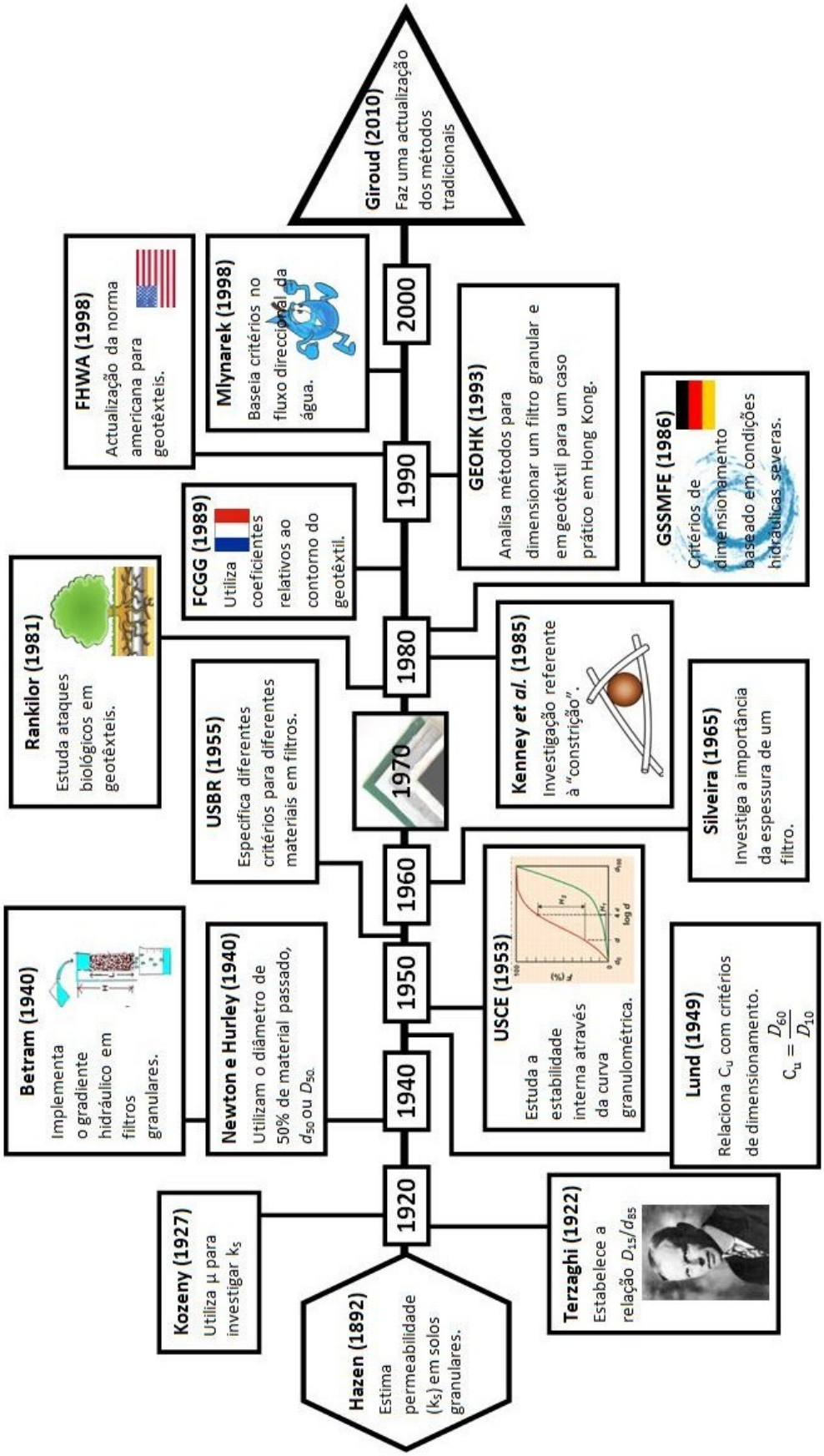


Figura 5. Cronologia do desenvolvimento de métodos para filtros granulares e em geotêxtil.

2.3. Problemas associados

Ao longo dos anos têm vindo a ser realizados várias experiências laboratoriais revelando alguns problemas dos filtros. No entanto, a experiência na sua aplicação tem revelado outras questões. De facto, é analisado casos de sucesso ou insucesso das obras que se pode validar e/ou, quando necessário, modificar os critérios e métodos de dimensionamento. Assim, pode optimizar-se o dimensionamento do filtro, evitando problemas, uma vez que a causa de muitos insucessos é o incorrecto dimensionamento do filtro.

No entanto, um bom desempenho não depende apenas do dimensionamento, pois um filtro danificado significa uma perda das suas características. Uma das principais causas da alteração das propriedades ocorre durante a sua instalação em obra e é designada por danificação durante a instalação (DDI). De facto, de acordo com Paula (2003), o processo de instalação pode sujeitar o filtro a acções mecânicas significativas. Note-se que até mesmo as vibrações induzidas pelos veículos de construção podem influenciar o comportamento do filtro [Hameiri e Fannin (1999)].

Os agentes do meio ambiente em que o filtro se encontra também podem alterar as suas propriedades. De entre estes é destacar a acção da água.

No caso de filtros granulares, o fluxo de água pode provocar a migração das partículas mais finas, que por sua vez aumenta o número de espaços vazios provocando uma instabilidade interna do filtro e um mau desempenho. Este fenómeno pode ser designado por lavagem. Além disto, este fluxo influencia as pressões hidráulicas exercidas sobre o filtro, ou seja, pode aumentar as acções mecânicas levando à rotura do filtro, seja por rasgamento do geotêxtil ou deslocamento de agregados.

Alguns exemplos de agentes que afectam a durabilidade do filtro, além da DDI já referida, são agentes químicos e biológicos. Estes podem alterar as características de ambos os tipos de filtros referidos (natural ou em geotêxtil).

Além destes, há dois outros fenómenos que afectam o desempenho dos filtros em geotêxtil, a colmatação e o “piping”.

A colmatação ocorre quando o filtro deixa de permitir a passagem de água devido às partículas finas do solo que provocam um entupimento das aberturas do filtro. A colmatação

(Figura 6) pode ocorrer por cegamento, bloqueamento e colmatação interna [Faure e Fry (2004)].

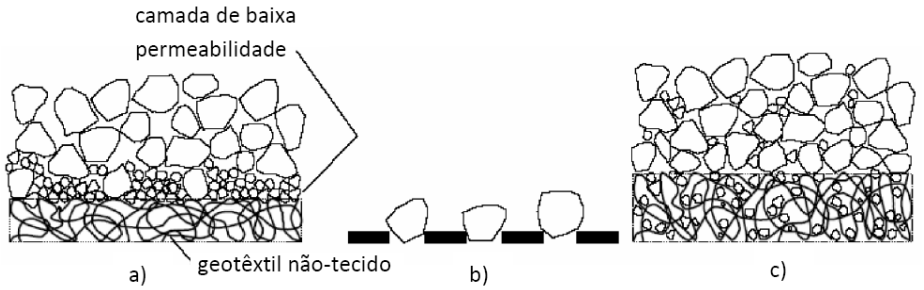


Figura 6. Colmatação de filtros [Muñoz (2005)]: a) cegamento; b) bloqueamento; c) colmatação interna.

A filtragem também tem como papel de prevenir o fenómeno de "piping". Este fenómeno consiste numa erosão interna do solo, no qual as partículas são transportadas pelo fluxo de água, assim criando um espaço ou "túnel" vazio que pode provocar a instabilidade do solo [D.D.U.S.A. (2004)].

Existem vários problemas associados com o uso de geossintéticos em sistemas de filtragem [Moraci e Mandaglio (2008)]. De facto, quando a abertura aparente dos poros é muito grande, o filtro permite a migração das partículas finas do solo base, assim contribuindo para a erosão do solo e assim uma instabilização deste.

Existem vários fenómenos associados a filtros geotêxteis [Moraci e Mandaglio (2008)]. Para além dos já mencionados, existem ainda os fenómenos de levantamento e "flapping" (Figura 7). O fenómeno de levantamento ocorre quando existe uma diferença de pressão hidráulica entre duas superfícies do geotêxtil, resultando em rupturas locais do solo base. Esta situação ocorre frequentemente em zonas onde existem variações do nível freático e depende da quantidade e duração do rebaixamento do nível de água, da permeabilidade e da compressibilidade do solo base. O "flapping" ocorre em condições turbulentas, pois o movimento cíclico de água provoca um destacamento entre o geotêxtil e o solo.

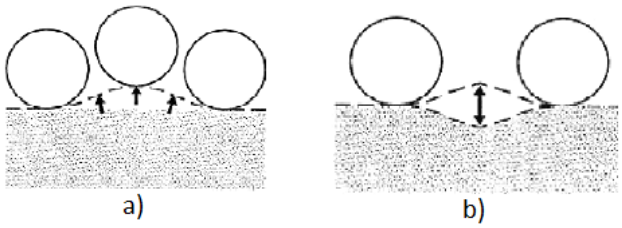


Figura 7. Fenómenos de: a) levantamento; b) "flapping" [Moraci e Mandaglio (2008)].

2.4. Ensaios e métodos de ensaio

2.4.1. Introdução

Nesta secção apresentam-se os ensaios laboratoriais necessários para obter os dados e informações relevantes para a função de filtragem. Incluem-se ainda métodos de ensaio de desempenho, realizados para verificar a viabilidade dos ensaios e dos dimensionamentos realizados através destes, tanto para casos comuns, como para casos mais particulares e com outras exigências.

Numa indústria em crescimento como a dos geotêxteis, é difícil encontrar uma única norma internacional, completamente unificada, para ensaios e métodos de ensaio. As organizações envolvidas nesta actividade (fornecedores de matéria-prima, fabricantes, engenheiros, etc.) distinguem ensaios de identificação e ensaios de desempenho. Estes termos têm um significado diferente para cada grupo de organizações, por exemplo, o ensaio de punçoamento, para um engenheiro civil pode ser um ensaio de classificação, mas para um fabricante pode ser um ensaio de controlo de qualidade de um processo de fabrico [Koerner (1999)]. Por exemplo, para tentar uniformizar os termos usados e assistir os engenheiros na preparação de especificações, a Sociedade Internacional de Geossintéticos preparou um documento com recomendações para a informação a incluir nesse tipo de documentos [I.G.S. (2006)].

Assim, salienta-se que os ensaios e os métodos de ensaios são referidos na perspectiva de um engenheiro civil, ou seja, para o dimensionamento. Deve-se ainda ter em atenção que muitos dos métodos de ensaio apresentados não têm por base procedimentos internacionalmente aceites. De facto, são apresentados ensaios propostos por diferentes organizações, que recorrem a critérios variados. Uma vez que a análise das semelhanças e diferenças entre estes métodos excede o objectivo deste trabalho, apenas são apresentados exemplos de ensaios.

Os ensaios laboratoriais permitem obter dados e informações relevantes para o dimensionamento de um filtro. No entanto, estes nem sempre são representativos da realidade e nem sempre são aplicáveis para todas as situações. Ensaios de avaliação do comportamento, realizados em obras reais, oferecem uma perspectiva mais realista do desempenho do filtro. Daí resulta a necessidade de comparar os ensaios com testes e

experiencias realizadas e, sempre que possível, fazer ensaios sob condições reais. Na Figura 8 apresenta-se a sequência ideal para o dimensionamento de um filtro e de avaliação da sua fiabilidade.

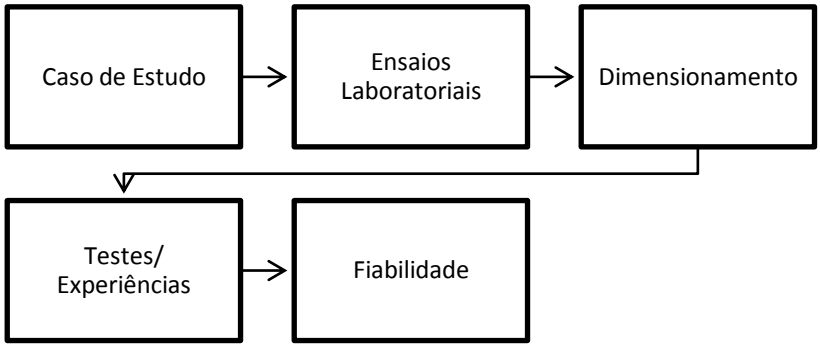


Figura 8. Sequência ideal para o dimensionamento de um filtro e de avaliação da sua fiabilidade.

Para um determinado caso de estudo, devem ser feitos ensaios laboratoriais para obter informação necessária para o dimensionamento. Assim, com as características do filtro obtidas do dimensionamento, devem ser implementados ensaios em verdadeira grandeza ou sob condições reais, com o objectivo de analisar o desempenho do filtro e saber a sua fiabilidade. Em alguns casos os ensaios laboratoriais podem suceder ao dimensionamento.

2.4.2. Filtros granulares

Os filtros granulares são utilizados há muito tempo e há experiência da sua utilização por períodos muito longos. Esta experiência permite que a avaliação do seu desempenho seja feita através dos sucessos em casos reais, em vez de se recorrer a ensaios laboratoriais. Por esta razão, os ensaios laboratoriais existentes para caracterizar filtros granulares são em menor número do que para filtros geotêxteis.

Segundo Ramos e Locke (2000), existem vários métodos de análise para o dimensionamento de um filtro granular. Existe o critério empírico [Sherard e Dunnigan (1985)], a modelagem analítica [Indraratna e Locke (2000)], e através de ensaios laboratoriais directos dos materiais [Sherard *et al.* (1984b)].

A utilização de ensaios sob condições reais, permite um nível de confiança mais elevado na selecção de materiais apropriados para o filtro. Este tipo de experiências é

particularmente vantajoso para materiais invulgares ou problemáticos, tais como solos dispersos ou com granulometria descontínua. Dependendo dos objectivos da experiencia, podem ser utilizados diferentes métodos.

O ensaio mais utilizado para determinar um filtro para solos coesivos é o ensaio NEF ("No Erosion Filter" ou Filtro Não Erosivo). Este ensaio foi proposto por Sherard e Dunnigan (1985) para testar solos coesivos como solos base, a proteger. A Figura 9 demonstra um equipamento típico deste ensaio. Neste ensaio, uma amostra do solo base é compactado no topo do filtro e é feita uma pequena abertura ("pinhole") que atravessa o solo base, para simular uma fuga localizada numa fenda. A água é introduzida na pequena abertura com alta pressão (suficiente para erodir o solo base). Este ensaio é considerado um sucesso se, visualmente, nenhuma erosão ocorre antes que o filtro sofre colmatação.

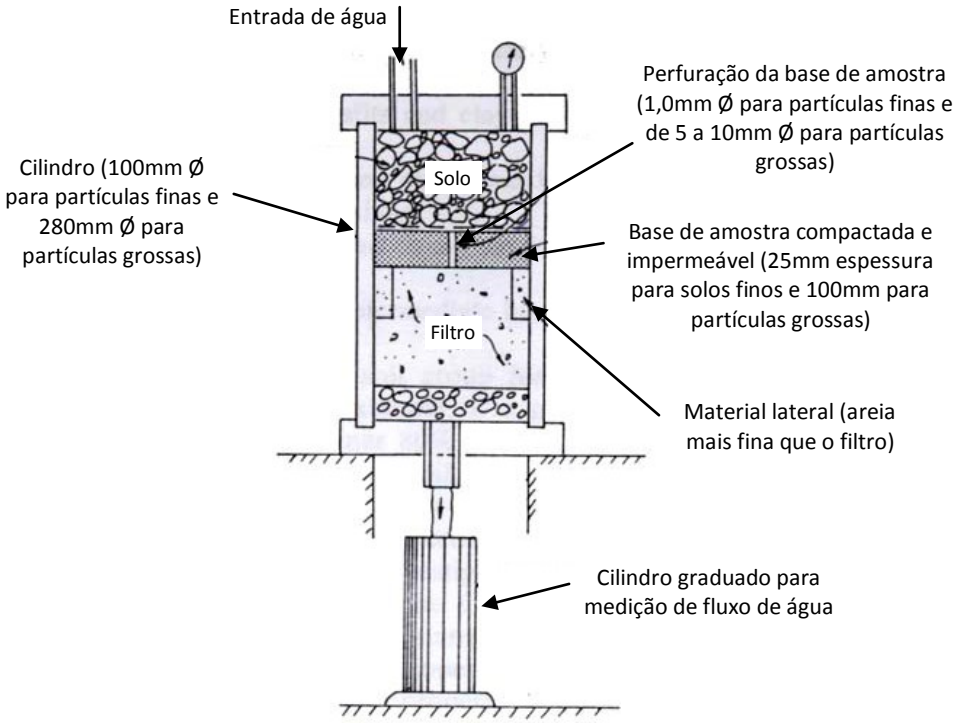


Figura 9. Aparelho de NEF [Yasrobi e Azad (2004a)].

Durante os estudos experimentais, Foster e Fell (1999) identificaram outro limite. Até esse limite os filtros podem parar a erosão, enquanto após este limite, os filtros não são capazes de controlar a erosão. Este limite corresponde ao limite de erosão contínua, que pode ser achado através do ensaio de CEF ("Continuos Erosion Filter" ou Filtro de Erosão Contínua), representado na Figura 10. Este ensaio é baseado no mesmo aparelho e método

do ensaio NEF, mas difere no que diz respeito a erosão do solo base, pois aceita-se alguma erosão, nomeadamente 0,25g/cm².

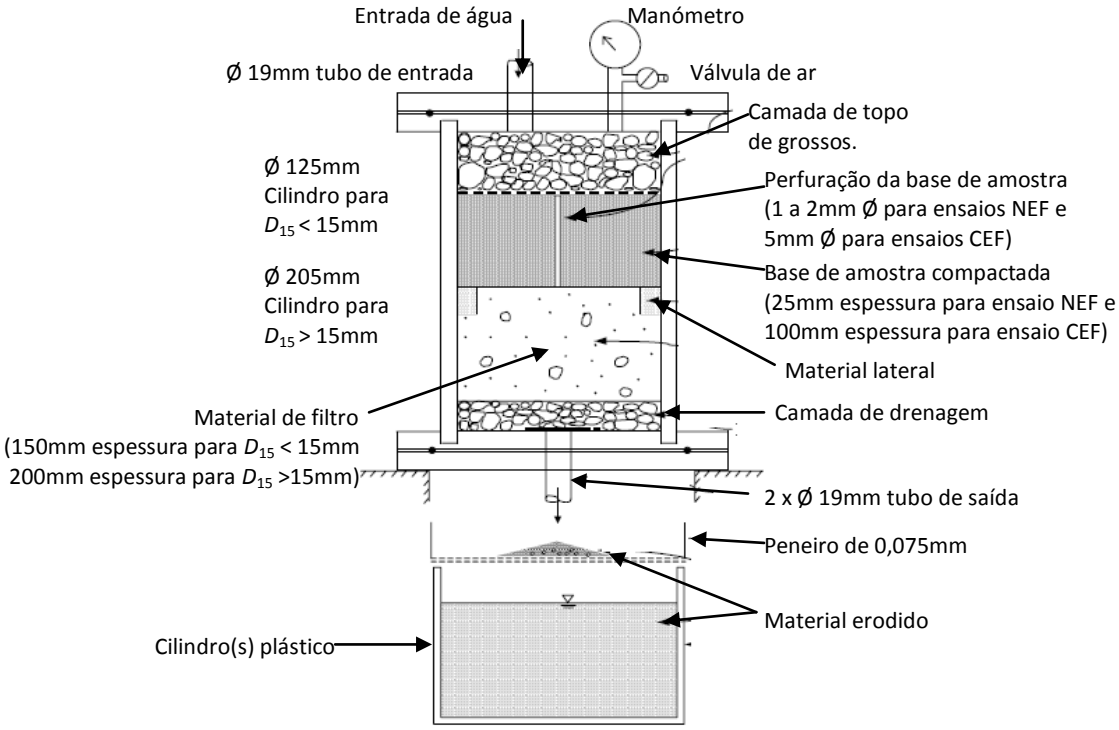


Figura 10. Aparelho de CEF [Yasrobi e Azad (2004a)].

Em conclusão, no que diz respeito aos ensaios para filtros granulares, o aparelho típico de NEF é a base de diferentes estudos, desde aqueles que utilizam argilas como solo base compactado sobre o filtro com água em alta pressão [Sherard *et al.* (1984b)], para solos coesivos ou no caso do Lafleur *et al.* (1989), para solo não coesivos.

2.4.3. Filtros geotêxteis

Como já foi mencionado, existem vários ensaios para caracterizar filtros geotêxteis. Também existem mais ensaios para estes filtros do que para filtros granulares. Isto deve-se ao facto que são necessários mais informações e detalhes acerca das características de um geotêxtil do que um agregado, pois existem mais critérios de dimensionamento para filtros geotêxteis. Mencionou-se também o facto de organizações diferentes terem ensaios diferentes. No Quadro A - 3 e no Quadro A - 4 apresentam-se alguns ensaios e normas existentes para definir as propriedades do geotêxtil. As propriedades são divididas em propriedades principais e em propriedades secundárias. Apesar de existirem estas normas, existem ainda estudos específicos, para casos mais particulares. Relativamente ao ASTM, pode-se encontrar os ensaios todos tabelados no documento T.R.I. (2011) e o documento I.G.S. (2006) faz referência às normas europeias.

Com os ensaios pretende-se garantir que ao dimensionar o geotêxtil, este vai desempenhar as funções pretendidas, sobreviver aos processos de instalação e que será suficientemente durável para desempenhar convenientemente as funções pretendidas durante a vida da obra.

A norma ISO 9863 [C.E.N. (2006)] consiste num ensaio para determinar a espessura de um geotêxtil para pressões diferentes. A Figura 11 demonstra o aparelho e esquematiza o ensaio, em que um geotêxtil é sujeito a uma tensão, sendo medida a espessura através da distância entre a superfície superior e inferior. Geralmente a espessura dos geotêxteis varia de 0,25 a 7,5mm.

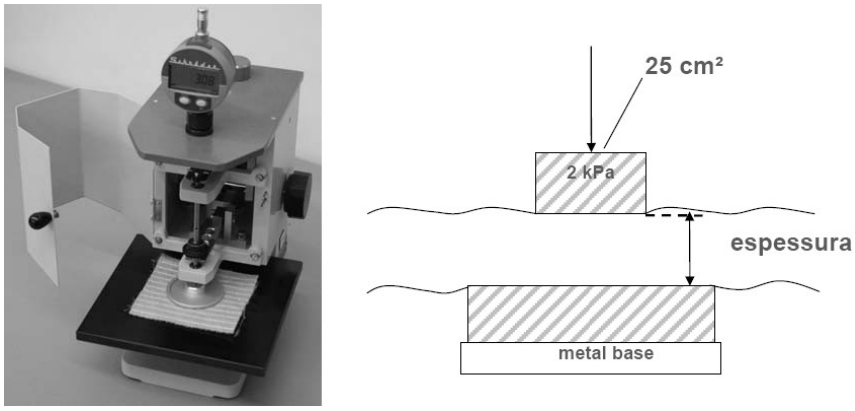


Figura 11. Ensaio para determinar espessura Pinho-Lopes (2009c).

A determinação da dimensão característica dos poros de um geotêxtil pode ser feita através de ensaios relativamente simples, como o descrito na norma EN ISO 12956 [C.E.N. (2010)]. O ensaio EN ISO 12956 utiliza o princípio de peneiração por via húmida, como demonstra a Figura 12. Uma quantidade de material granular de granulometria conhecida (normalmente solo) é colocado sobre a superfície do geotêxtil e lavado com água. O geotêxtil actua como um peneiro e o material granular, que passa pelo geotêxtil, é analisado. O tamanho da abertura característica (O_{90}) do geotêxtil corresponde a uma dimensão específica do material granular passado (d_{90}).

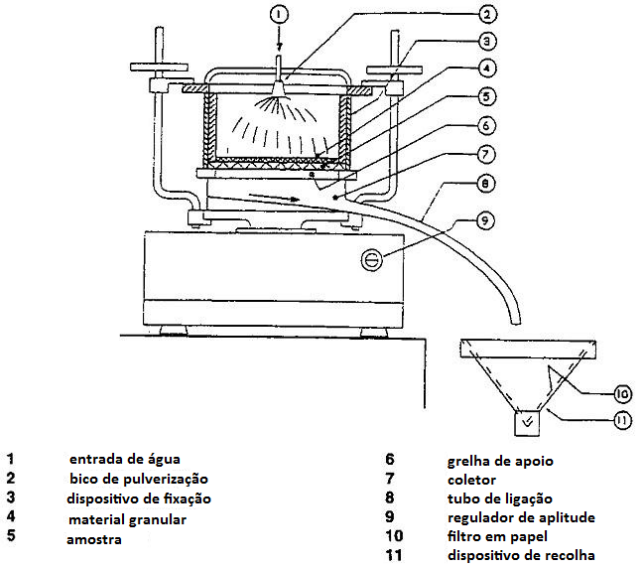


Figura 12. Exemplo de equipamento de peneiração por via húmida [Pinho-Lopes (2009c)].

Relativamente à determinação da permeabilidade, as normas ASTM D4716 [A.S.T.M. (2003)] e EN ISO 12958 [C.E.N. (2005a)] descrevem ensaios muito similares, diferindo essencialmente no tamanho do provete. Note-se que esta propriedade é sobretudo relevante para a função de drenagem. Através do aparelho esquematizado na Figura 13, é possível avaliar a permeabilidade no plano do geotêxtil do geotêxtil, pois este aparelho adopta a Lei de Darcy. Permite medir a taxa de fluxo, por unidade de comprimento do geotêxtil para condições específicas. Este método é limitado a um fluxo unidireccional, pois o líquido que atravessa o geotêxtil, é removido directamente para não criar condições turbulentas que podem influenciar os resultados, ou seja, a taxa de fluxo.

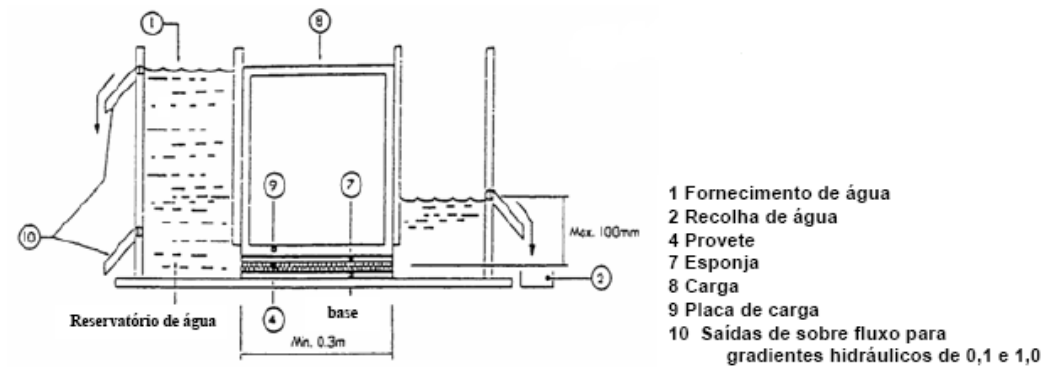


Figura 13. Exemplo do equipamento típico para avaliar a permeabilidade do geotêxtil plano [Pinho-Lopes (2009c)].

Uma vez que esta norma apenas se aplica para um fluxo unidireccional, apesar de existirem outras normas, pode-se optar por estudos específicos, como no caso do Zhao *et al.* (2000). Estes autores estudaram filtros geotêxtil sujeitos a ondas cíclicas. A Figura 14 ilustra um equipamento para avaliar fluxos bidireccionais que foi criado na Universidade de Singapura para a realização do estudo referido.

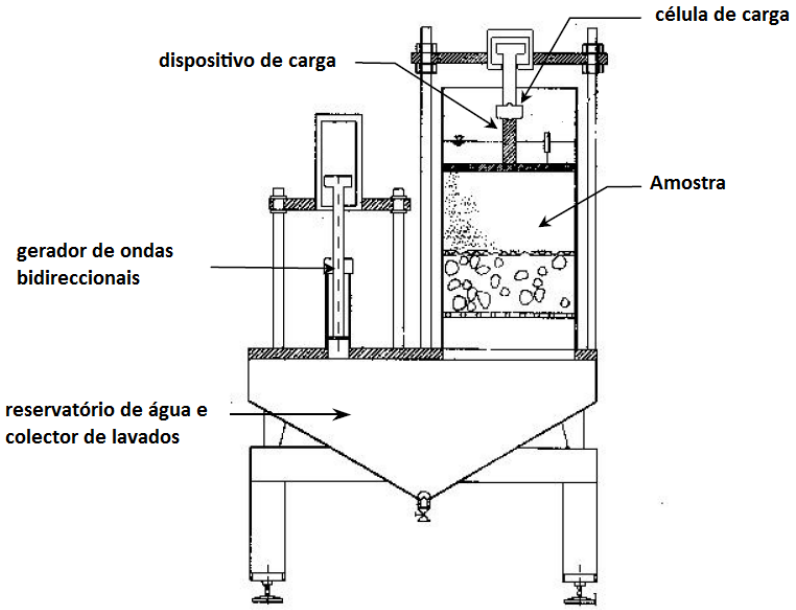


Figura 14. Aparelho de fluxo bidireccional [Zhao *et al.* (2000)].

Há um ensaio que avalia a resistência à colmatação de um geotêxtil quando este está sujeito a condições hidráulicas severas [A.S.T.M. (2006)]. Este aparelho (Figura 15) mede a razão entre gradientes do geotêxtil, o que permite verificar se o geotêxtil cumpre os requisitos de colmatação.

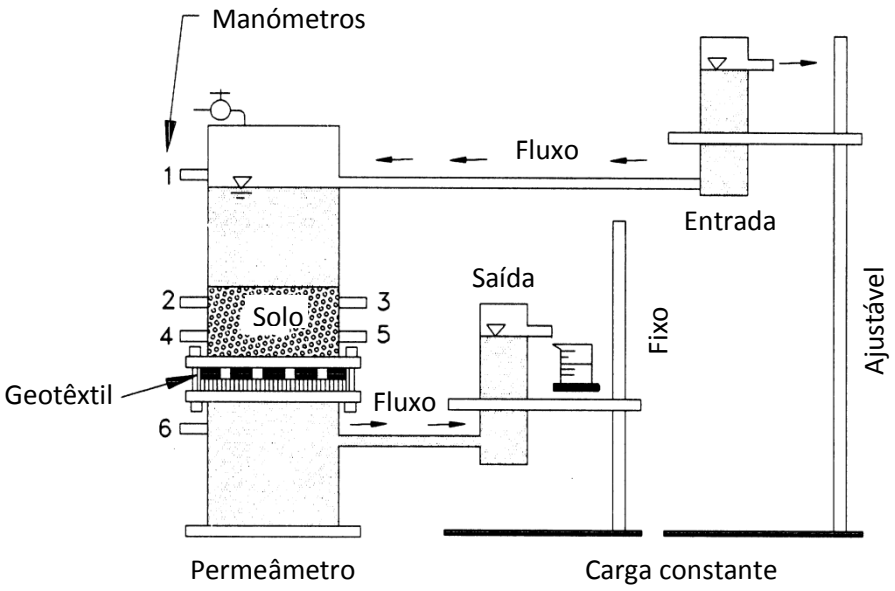


Figura 15. Aparelho para a medição da razão gradiente, adaptado de Pinho-Lopes (2009b).

A resistência ao punçoamento pode ser medida em condições dinâmicas ou estáticas. No ensaio de punçoamento dinâmico, também conhecido como o ensaio de queda de cone, tal como o nome sugere, um cone com 1kg é largado de uma altura de 1m em direcção a um provete fixo numa pega circular. O diâmetro do buraco aberto é medido através de uma escala graduada num cone de alumínio. A Figura 16 ilustra o cone usado tal como o aparelho do ensaio.

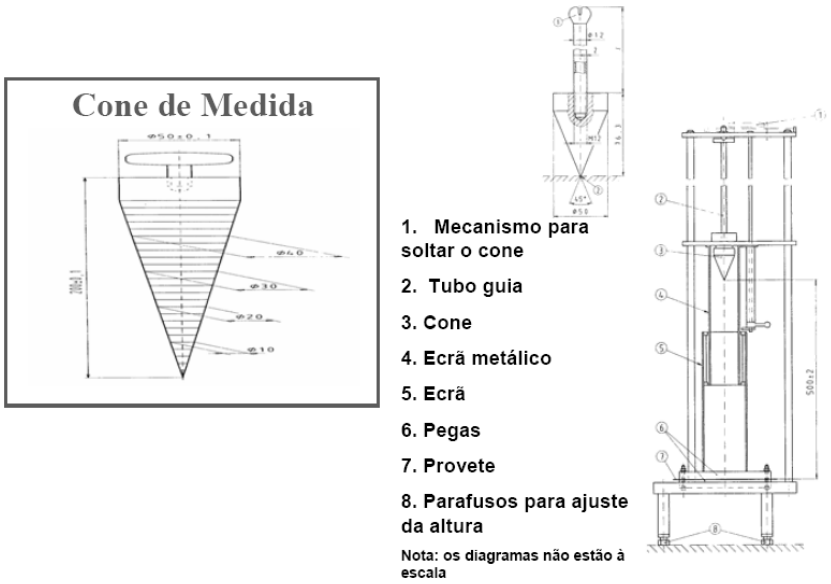


Figura 16. Ensaio de punçoamento dinâmico [Pinho-Lopes (2009c)].

O ensaio de punçoamento estático é também conhecido com ensaio CBR, porque utiliza o equipamento de CBR e consiste na queda de um pilão, com 50mm de diâmetro, a

uma velocidade de 50 ± 10mm/min. Este entra num provete fixo numa pega circular e mede-se a força e o deslocamento. A Figura 17 ilustra o equipamento CBR na máquina do ensaio e a colocação do provete na pega circular.

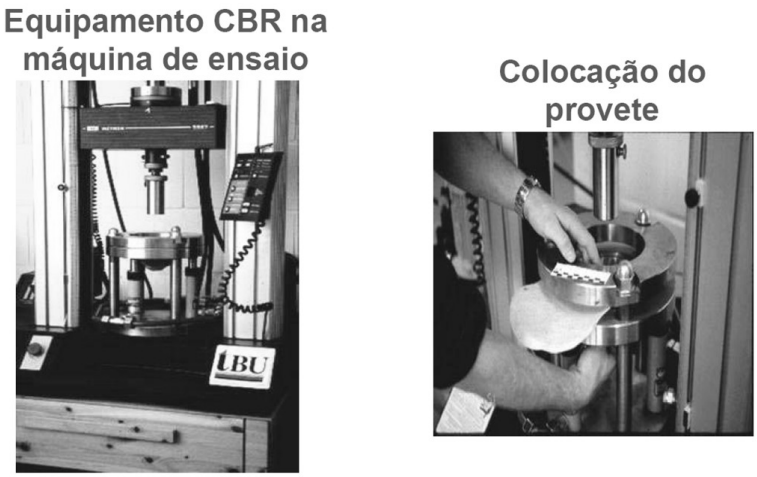


Figura 17. Ensaio de punçoamento estático Pinho-Lopes (2009c).

O ensaio ASTM D4491 [A.S.T.M. (2009a)] consiste em determinar a permeabilidade normal (e a permissividade) do geotêxtil, este é muito semelhante ao ensaio ISO 11058 [I.S.O. (1999)].

A Figura 18 apresenta um esquema dos ensaios propostos para a determinação da permissividade. Como os geotêxteis costumam apresentar elevada permeabilidade, algumas normas sugerem que o fluxo se faça através de uma “pilha” de provetes, o que, além de facilitar a condição de fluxo laminar, permite analisar o comportamento médio [Vidal (2009)].

No caso dos geotêxteis não tecidos, os provetes podem ser simplesmente sobrepostos, entretanto, quando se trata de um tecido os provetes devem ser espaçados cerca de 10mm [Vidal (2009)].

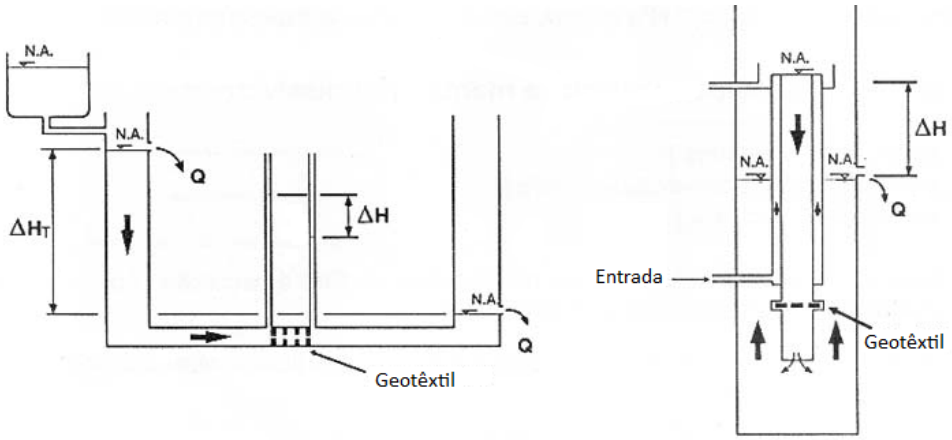


Figura 18. Ensaio de permissividade [Vidal (2009)].

Os ensaios relacionados com os danos durante a instalação são diversos, mas referem-se principalmente à avaliação das propriedades mecânicas do geotêxtil de curto prazo, após a sua danificação. Existe uma norma [C.E.N. (1998)] que indica como fazer a recolha de amostras de campo e caracterizá-las em laboratório. De seguida realizam-se ensaios para determinar as propriedades hidráulicas residuais, nomeadamente à permissividade [A.S.T.M. (2009a)]. Pode ainda ser feito um ensaio no qual o processo de instalação e os seus efeitos são simulados em laboratório – [EN ISO 12722: 2007].

A Figura 19 ilustra um equipamento para indução em laboratório da danificação durante a instalação (DDI). O ensaio consiste em colocar a amostra de geotêxtil numa janela, entre duas camadas de um agregado sintético designado por *corundum*. Posteriormente é aplicado um carregamento sinusoidal sobre uma placa (100mm por 200mm): 200 ciclos com tensões entre 5kPa e 500kPa; em seguida o provete é retirado. Este procedimento é o de um ensaio de identificação. Para fazer um ensaio de avaliação de desempenho tem de se usar o solo da obra e os equipamentos previstos para o espalhamento e compactação do solo. Por exemplo, Paula (2003) faz um estudo laboratorial de DDI.

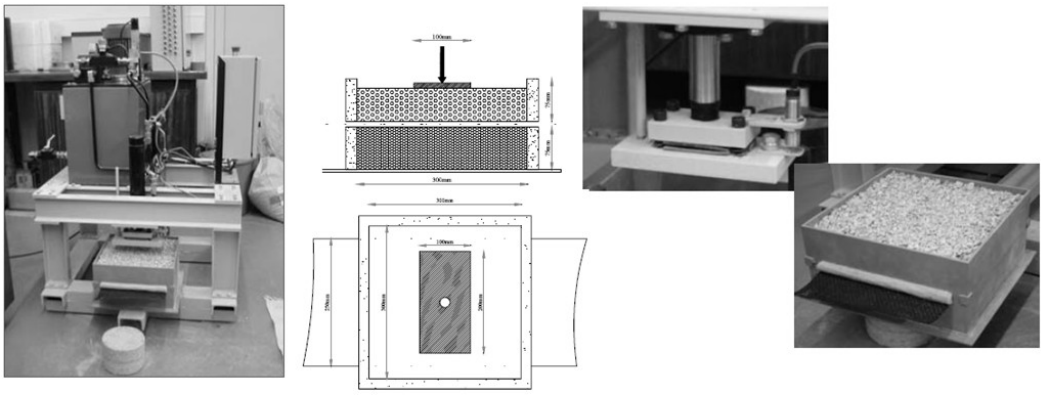


Figura 19. Ensaio de simulação de DDI Pinho-Lopes (2009c).

A resistência à tracção de um geotêxtil não é fundamental para que este desempenhe a função de filtragem, no entanto, não deixa de ser uma propriedade relevante. É natural que as solicitações mecânicas mais relevantes a que um filtro esteja sujeito sejam as associadas aos procedimentos de instalação em obra. Em geral, o ensaio realizado para avaliar a resistência à tracção de geotêxteis é o descrito na EN ISO 10319: (2008) [CEN (2008)], havendo outras normas semelhantes [A.S.T.M. (2009b)]. Nestes ensaios o geotêxtil é ensaiado isoladamente (sem estar confinado em solo). Na Figura 20 está ilustrado um equipamento pouco comum, que permite fazer ensaios de tracção de geotêxteis confinados em solo.

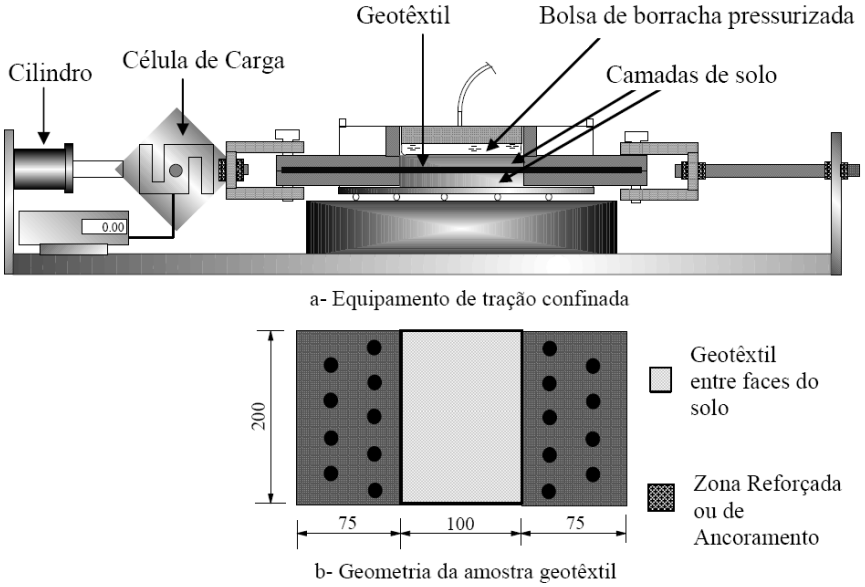


Figura 20. Equipamento para medir resistência à tracção de geossintéticos confinados em solo [Martins (2000)].

No entanto, os ensaios de tracção mais comum estão demonstrados na Figura 21, onde apresenta o ensaio de tracção concentrado e distribuído em bandas estreitas e em bandas largas.

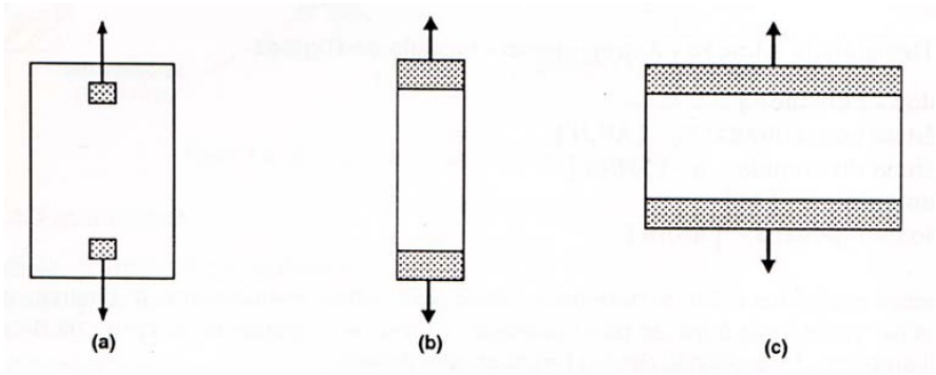


Figura 21. Ensaios de tracção: a) concentrado ("grab test"); b) distribuído (em bandas estreitas); c) distribuído (em bandas largas) [Vidal (2009)].

Relativamente à durabilidade, uma questão importante, existem várias normas e métodos de ensaios. O Quadro A - 4 apresenta algumas normas, pois existem muitos autores que realizaram estudos específicos ligados ao este assunto de durabilidade. Robert e Koerner (2009) estudaram a colmatação biológica de um filtro geotêxtil. Hameiri e Fannin (1999) analisaram o desempenho de um filtro geotêxtil quando sujeito a vibrações severas. Isto significa que apesar de existirem normas, devem-se procurar outros critérios que são mais apropriados ao caso em estudo, ou seja, à obra.

Pinho-Lopes e Lopes (2010) referem outros ensaios que procuram simular o efeito da queda de blocos sobre geossintéticos (Figura 22 e Figura 23).

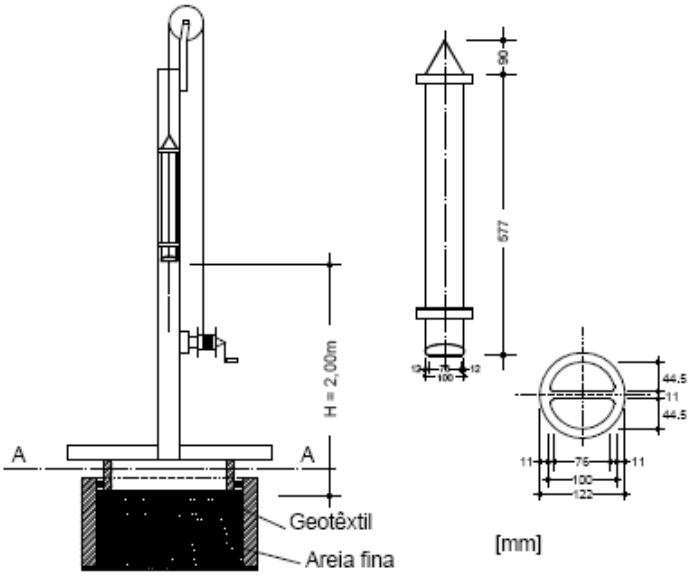


Figura 22. Ensaio laboratorial para a simulação de queda de blocos e de material rochoso Pinho-Lopes e Lopes (2010).

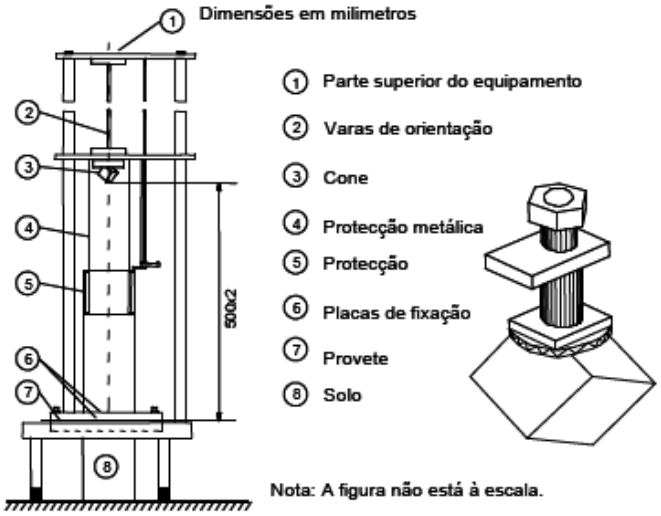


Figura 23. Ensaio laboratorial de queda de pirâmide Pinho-Lopes e Lopes (2010).

Em conclusão, existem uma abundância de normas e métodos de ensaios, normas aceites pelas organizações diferentes, sejam elas locais (ASTM) como internacionais (IGS), e até métodos criados para casos de estudo específicos (Faure e Lelay (2002)). Como foi mencionado, os métodos têm uma maior validade quando postos à prova em casos reais.

3. DIMENSIONAMENTO DE FILTROS

3.1. Filtros granulares

3.1.1. Propriedades

Referiu-se que um dos condicionantes de um filtro é o meio em que se encontra, pelo que é de realçar a importância de conhecer as propriedades e parâmetros solo a proteger e do filtro granular. Segundo G.E.O.H.K. (1993), os principais factores que definem o desempenho dum filtro eficaz e adequado são os seguintes:

1. A retenção do solo base: a dimensão dos vazios do filtro deve ser a mais pequena possível, de modo que impeça a passagem das partículas finas do solo base para dentro do filtro.
2. Permeabilidade do solo base e do filtro: o filtro deve ser mais permeável do que o solo base e permitir a passagem da água, tanto em condições estacionárias como em condições turbulentas e/ou dinâmicas.
3. Estabilidade interna: o material granular do filtro deve ser capaz de permitir a passagem de água sem perder as suas partículas mais finas.
4. Espessura mínima do filtro: o filtro deve ter uma espessura suficiente para travar partículas do solo base que estão a ser transportadas, e com a acumulação nos vazios do filtro, ainda ser capaz de desempenhar a sua função.

Existem outros parâmetros, para além dos principais previamente listados, que podem contribuir para o bom funcionamento dum filtro granular. O Quadro 3 [Yasrobi e Azad (2004a)] lista os parâmetros efectivos para o funcionamento de um filtro granular, incluindo os autores que propuseram a consideração de cada um desses parâmetros.

Quadro 3. Parâmetros efectivos um filtro granular [Yasrobi e Azad, (2004b)].

Parâmetros efectivos	Autor
Curva granulométrica e parâmetros relevantes	Terzaghi (1922)
Permeabilidade	Vaughan e Soares (1982)
Partículas finas do filtro	Foster e Fell (1999)
Forma das partículas do filtro	Bertram (1940)
Massa volúmica	Jahanandish e Abolghasempoor (2003)*
Gradiente hidráulico	Leonard et al. (1991)*
Estabilidade interna do filtro	Kenney e Lau (1985)
Espessura do filtro	Indraratna e Vafai (1997)
Solos problemáticos	Farzaneh (2000)*
Propriedades físico-químicas	Reddi et al. (2000)*
Distribuição das partículas no filtro (distribuição de vazios)	-

* Referências sem acesso à documentação

Em conclusão, o dimensionamento e execução de um filtro granular deve cumprir os seguintes requisitos fundamentais [G.E.O.H.K. (1993)]:

1. Estabilidade: a abertura aparente dos poros deve ser mínima para prevenir uma excessiva migração das partículas do solo base, assim criando estabilidade estrutural. Ao mesmo tempo, deve também garantir estabilidade do próprio filtro, ou seja, prevenir a migração do próprio material granular do filtro.
2. Permeabilidade: o filtro tem que ser suficientemente mais permeável do que o solo a ser drenado. Deve ainda ser não coesivo de modo a prevenir a formação de fendas de retracção no filtro, resultantes de secagem.
3. Segregação: As características granulométricas do filtro devem-se manter correctamente ao longo da vida útil, isto é, os agregados usados devem manter as suas características, antes, durante e após a instalação.
4. Resistência: deve possuir uma resistência físico-química, ou seja, o material granular deve ter resistência às acções químicas que podem alterar as características granulares. Estes devem ainda possuir resistência mecânica, ou seja, resistir às movimentações do solo provocado por vibrações (passagem de camiões, pequenos sismos).

3.1.2. Dimensionamento

As regras simplificadas de cálculo de filtros granulares têm por base dois principais critérios: o de retenção das partículas e o de permeabilidade. Referiram-se anteriormente ainda mais dois critérios secundários: o de estabilidade interna e o de espessura mínima.

Em geral, os métodos utilizam uma relação entre o diâmetro de agregado do filtro, D_m, e o diâmetro do solo base, d_m, tal que m é a percentagem de partículas que passaram no processo de peneiração. Estes diâmetros são representados em mm.

A capacidade que um filtro possui para reter as partículas do solo base depende do espaço de vazios, que devem ser o mais pequeno possível, assim actuando como uma barreira para o solo a filtrar. Por outro lado, o filtro deve possuir uma abertura de poros suficiente de modo a permitir a passagem de água - permeabilidade. Giroud (2005) refere que tradicionalmente (isto é, de acordo com a formula de Terzaghi), o critério de retenção e permeabilidade para filtros granulares é:

$$D_{15} \leq 4d_{85} \text{ ou } 5d_{85} \quad (1)$$

$$D_{15} \geq 4d_{15} \text{ ou } 5d_{15} \quad (2)$$

Onde D_{15} é a dimensão das partículas correspondente a 15% de passados do agregado que constitui o filtro e d_{85} e d_{15} representam, respectivamente, 85% e 15% das partículas do solo base que passaram no processo de peneiração. A Equação (1) refere-se ao critério de retenção, em que a dimensão das partículas correspondente a 15% de passados do agregado de filtro não pode ser demasiado grande. A Equação (2) significa que a mesma dimensão não pode ser demasiado pequena, critério de permeabilidade. Apesar das modificações destas equações por outros métodos, o conceito básico mantém-se, diferindo apenas nos factores (de 4 ou 5). Salienta-se o facto de o método de Terzaghi utilizar o D_{15}, pois está relacionado com a dimensão de abertura dos poros na Equação (3):

$$\text{Abertura dos poros} \approx D_{15}/5 \quad (3)$$

Alguns métodos de dimensionamento de filtros granulares incluem a uniformidade dos solos, ou seja, é introduzido o coeficiente de uniformidade (C_u) em relação aos diâmetros dos agregados (*D*) e solo (*d*). Este coeficiente é dado por Equação (4):

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \tag{4}$$

No entanto, Giroud (2010) analisa o coeficiente de uniformidade linear, em que faz uma truncagem da curva granulométrica do solo base (Figura 24), obtendo assim o d'_m, representativo do diâmetro do solo correspondente a m% de passados para esta linha de uniformidade.

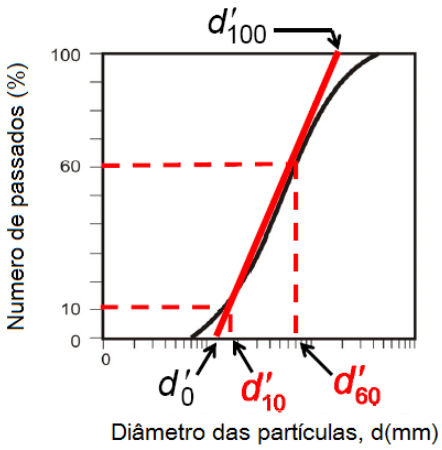


Figura 24. Recta representativa do coeficiente de uniformidade linear [Giroud (2010)].

Então, fazendo a relação entre Equações (1) e (4), usando factores diferentes para coeficientes de uniformidade diferentes, tem-se o critério de retenção no Quadro 4 (citado de U.S.C.E. (1953) por Pinho-Lopes (2009a)).

Quadro 4. Critério de retenção [U.S.C.E. (1953)].

Referência	Critério de retenção
U.S. Waterways Experiment Station (1953)	Quando: $C_u \leq 1{,}5$ vem $D_{15}/d_{85} \leq 6$ $C_u \leq 4$ vem $D_{15}/d_{15} \leq 40$

Vários autores verificam que D_{15} é um parâmetro útil para o critério de retenção, mas a discrepância de resultados entre os métodos pode ser devida às diferentes condições hidráulicas usadas durante as investigações [G.E.O.H.K. (1993)].

Relativamente à permeabilidade, a regra geral é que o filtro deve ser suficientemente mais permeável do que o solo a reter. Hazen (1892) propõe a Equação (5) para achar a permeabilidade de um solo granular [G.E.O.H.K. (1993)]:

$$k_S = C.D_{10}^2 \tag{5}$$

Calcula-se assim um coeficiente de permeabilidade do solo (k_S em m/s) através do produto do D_{10} (em mm) e uma constante empírica (C) que pode variar (de 0,0041 a 0,0146) mas, em geral, toma o valor de 0,01. Terzaghi (1922) adaptou a Equação (5), introduzindo a porosidade do solo (n) e alterando o valor da constante: C varia entre 8, para areias com partículas arredondadas, e 4,6 para areias com partículas angulosas [G.E.O.H.K. (1993)] – Equação (6).

$$k_S = C.\left[\frac{n\text{-}0{,}13}{\sqrt[3]{1\text{-}n}}\right]^2 D_{10}^2 \tag{6}$$

Giroud (2010) faz uma modificação do critério tradicional de permeabilidade, considerando o fluxo hidráulico. Este autor propõe avaliar a condutividade hidráulica do filtro (k_f em m/s) em relação a condutividade hidráulica do solo (k_S em m/s) e o gradiente hidráulico (i_S):

$$k_f \geq \max(i_S k_S,\ 25k_S) \tag{7}$$

Giroud (2010) considera o número de aberturas por unidade de área, pois são estas aberturas que permitem a passagem da água, logo deve existir um número mínimo de aberturas para garantir a passagem da água, isto é, considera uma porosidade (N_o):

$$N_o \approx \frac{0{,}1}{O_f^2} \tag{8}$$

Onde O_f relativo ao critério de retenção, é a dimensão característica de abertura (Giroud (2010) utiliza unidade de mícron para este parâmetro), que depende do coeficiente de uniformidade do filtro (C_u). No Quadro 5 são apresentadas as equações propostas por Giroud (2010).

Quadro 5. Dimensão característica de abertura de filtros granulares [Giroud (2010)].

$C_u \leq 3$	$C_u \geq 3$	Característica do solo a proteger
$O_f \leq (C_u)^{0,3} d_{85}$	$O_f \leq \frac{9d_{85}}{(C_u)^{1,7}}$	Solto
$O_f \leq 1,5(C_u)^{0,3} d_{85}$	$O_f \leq \frac{13,5d_{85}}{(C_u)^{1,7}}$	Moderadamente denso
$O_f \leq 2(C_u)^{0,3} d_{85}$	$O_f \leq \frac{18d_{85}}{(C_u)^{1,7}}$	Denso

Um filtro é considerado estável quando as partículas do mesmo não se deslocam com a passagem de água. A estabilidade interna depende das características granulométricas, da porosidade, a homogeneidade do material e das forças hidráulicas.

Segundo Scheurenberg (1986), filtros constituídos por partículas uniformes, normalmente, têm maior estabilidade interna. A instabilidade estrutural do filtro pode ocorrer se os agregados não são uniformes. Segundo a investigação realizada por Kenney e Lau (1985) e Kenney e Lau (1986), a instabilidade é mais provável de ocorrer em solos que possuem uma maior inclinação no fundo da sua curva granulométrica, ou seja, que possuem uma maior discrepância entre os diâmetros das partículas [G.E.O.H.K. (1993)]. Assim, de acordo com outros métodos para além destes, considera-se a coeficiente de uniformidade (C_u) o parâmetro principal para avaliar a estabilidade interna.

A Figura 25 ilustra a proposta de Kenney e Lau (1985) e Kenney e Lau (1986) sobre a avaliação da estabilidade interna através de uma curva granulométrica e uma curva de forma.

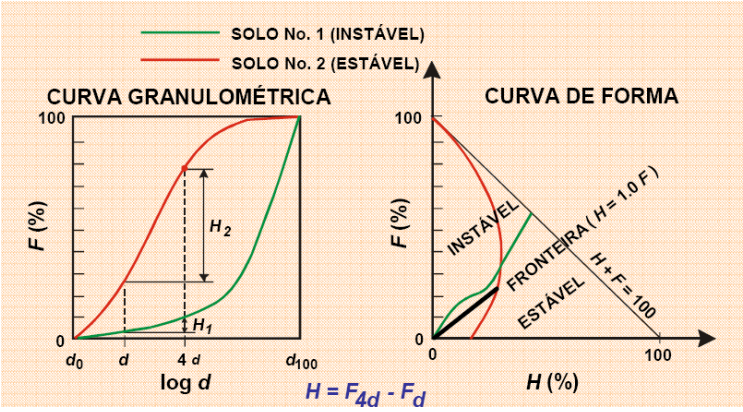


Figura 25. Avaliação da estabilidade interna [Pinho-Lopes (2009b)].

Para prevenir qualquer perda de partículas, a espessura do filtro deve ser maior que a distância percorrida. No entanto, uma vez que os filtros granulares são espessos e apresentam um elevado número de constrições, o critério de espessura normalmente é desprezado, pois a espessura mínima necessária é quase sempre verificada [Giroud (2010)].

3.2. Filtros geotêxteis

3.2.1. Propriedades

A estrutura, sistema ou componente falha se não completa e cumpre os critérios de desempenho [Giroud (2005)]. Assim, deve-se conhecer os factores que afectam o dimensionamento de um filtro geossintético:

1. Tipo dos solos: deve-se conhecer os solos no local, as suas dimensões, granulometria, etc.
2. Fluxo hidráulico: conhecer o fluxo de água, em particular, se é unidireccional ou bidireccional.
3. Condições hidráulicas: se o filtro se encontra em condições estacionárias ou em condições turbulentas e/ou dinâmicas.
4. Tempo útil de vida: quanto tempo o filtro deve desempenhar a sua função.

Além destes conhecimentos, deve-se considerar sempre as consequências caso haja ruptura do filtro.

Muitos dos problemas associados com o dimensionamento de um filtro em geotêxtil resultam da necessidade de cumprir os dois requerimentos conflituosos: a retenção e a condutividade hidráulica [Mlynarek (1998b)]. Ambos critérios devem ser satisfeitos para prevenir o aumento de pressão hidrostática dentro do solo base, e a evitar a contaminação de drenos adjacentes pelas partículas finas do solo base que são transportados pela água.

Consideram-se, assim, os seguintes critérios de dimensionamento principais [Giroud (2006)]:

1. Retenção: o geossintético deve reter o solo base de modo a prevenir o fenómeno de "piping".
2. Permeabilidade: deve assegurar a passagem de água de modo a garantir um fluxo adequado, de modo a prevenir um excesso de pressão de água posterior ao filtro.
3. Resistência à colmatação: o filtro deve prevenir o fenómeno de colmatação a longo prazo, assim desempenhando a sua função ao longo da vida útil da obra.
4. Sobrevivência: o geossintético deve resistir às acções físico-químicas, incluindo as acções durante a instalação.

Assim, de modo a cumprir estes critérios, podem listar-se as propriedades ou características a serem analisadas em filtros geotêxteis [Muñoz (2005)] e [Freitas (2003)]:

1. Propriedades físicas: massa por unidade de área, espessura nominal, porosidade, densidade dos polímeros.
2. Propriedades hidráulicas: permeabilidade normal ao plano, dimensão característica de aberturas, aptidão à passagem de água.
3. Propriedades mecânicas: compressibilidade, resistência à tracção não confinada, resistência à penetração por punçoamento estático, resistência à perfuração dinâmica.
4. Propriedades de interface: deslizamento e arranque.

3.2.2. Dimensionamento

A metodologia para o dimensionamento de um filtro geotêxtil é baseada, em geral, na de filtros granulares. Mantêm-se os critérios fundamentais de retenção e permeabilidade, mas é necessário adicionar mais critérios. Seguem-se sete passos para a determinação de um filtro [Mirafi (2010)]:

1. Definir as exigências para a aplicação do filtro.
2. Definir as condições fronteira.
3. Determinar as exigências de retenção do solo.
4. Determinar as exigências de permeabilidade.
5. Determinar as exigências de colmatação.
6. Determinar as exigências de sobrevivência.
7. Determinar as exigências de durabilidade.

Com base nisto, definem-se as regras simplificadas de dimensionamento de filtros, que se baseiam nos seguintes critérios [Pinho-Lopes (2009a)]:

1. Critério de retenção.
2. Critério de permeabilidade.
3. Critério de colmatação ou porosidade.

Para além destes, deve-se introduzir outros critérios que garantirão o funcionamento do filtro durante a sua utilização:

1. Critério de espessura.
2. Critério de sobrevivência.
3. Critério de durabilidade.

Mlynarek (1998b) propõe uma metodologia para escolher correctamente um geotêxtil, de modo a obter um filtro que desempenha a retenção. Consiste em três passos:

i. Identificação das condições hidráulicas. Consiste em avaliar o fluxo hidráulico, se é unidireccional ou bidireccional.
ii. Avaliar o comportamento de um dado solo na filtragem, baseado na distribuição granulométrica do solo e outras características, como índice de plasticidade e potencial dispersão.
iii. Os resultados baseados no primeiro e segundo passos.

O critério de retenção baseia-se na Equação (1). No entanto, evidentemente, neste caso, o D_{15} refere-se às características do geotêxtil, à dimensão de abertura do geotêxtil (O_I). Tem-se então uma equação genérica do tipo:

$$O_f \leq R_R \times d_m \tag{9}$$

Dependendo do método, O_f pode ter um significado diferente [Pinho-Lopes (2009a)]:

O_{90} e O_{95} - dimensão das aberturas do geossintético (determinada a seco)

$O_e = O_{90}$ - dimensão efectiva da abertura do geossintético (determinada por peneiração por via húmida)

$O_f = O_{95}$ - dimensão de abertura de filtragem (determinada por peneiração hidrodinâmica)

R_R - Razão de retenção, depende de condições hidráulicas, propriedades do solo, estado de tensão. Lafleur (1999) considera esta razão como a dada pela Equação (10) [Pinho-Lopes (2009b)]:

$$R_R = \frac{O_{90}}{d_m} \tag{10}$$

Onde d_m é a dimensão indicativa do solo base.

Ainda no que diz respeito ao critério de retenção, Giroud (2010) realça a importância do índice de compacidade (I_D). Assim considere-se a Equação (11) para calcular este índice:

$$I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{mín}} \tag{11}$$

Em que e é o índice de vazios natural do solo e e_{max} e $e_{mín}$ são os valores máximo e mínimo dessa grandeza.

No que diz respeito ao critério de permeabilidade, este tem a seguinte forma:

$$k_{GTX} > C.k_S \tag{12}$$

Em que k_{GTX} e k_S são os coeficientes de permeabilidade do geotêxtil e do solo, respectivamente. O C é um valor constante para contabilizar a compatibilidade a longo prazo entre o solo e o geotêxtil. Este critério deve cumprir dois requisitos, a pressão hidráulica nas aberturas e o estado de fluxo hidráulico [Giroud (2010)].

O valor mínimo de C a utilizar é a unidade. Contudo, com vista à verificação da compatibilidade a longo prazo entre o solo e o geotêxtil recomenda-se valores mínimos de 10, para geotêxteis tecidos e não tecidos finos (espessura inferior a 2mm), ou 100 para não tecidos espessos (espessura superior a 2mm) [Pinho-Lopes (2009a)].

Apresentam-se as propostas de Mirafi (2010), critérios de retenção do solo para condições hidráulicas estáticas e dinâmicas, ilustrado na Figura 26 e na Figura 27 e, respectivamente.

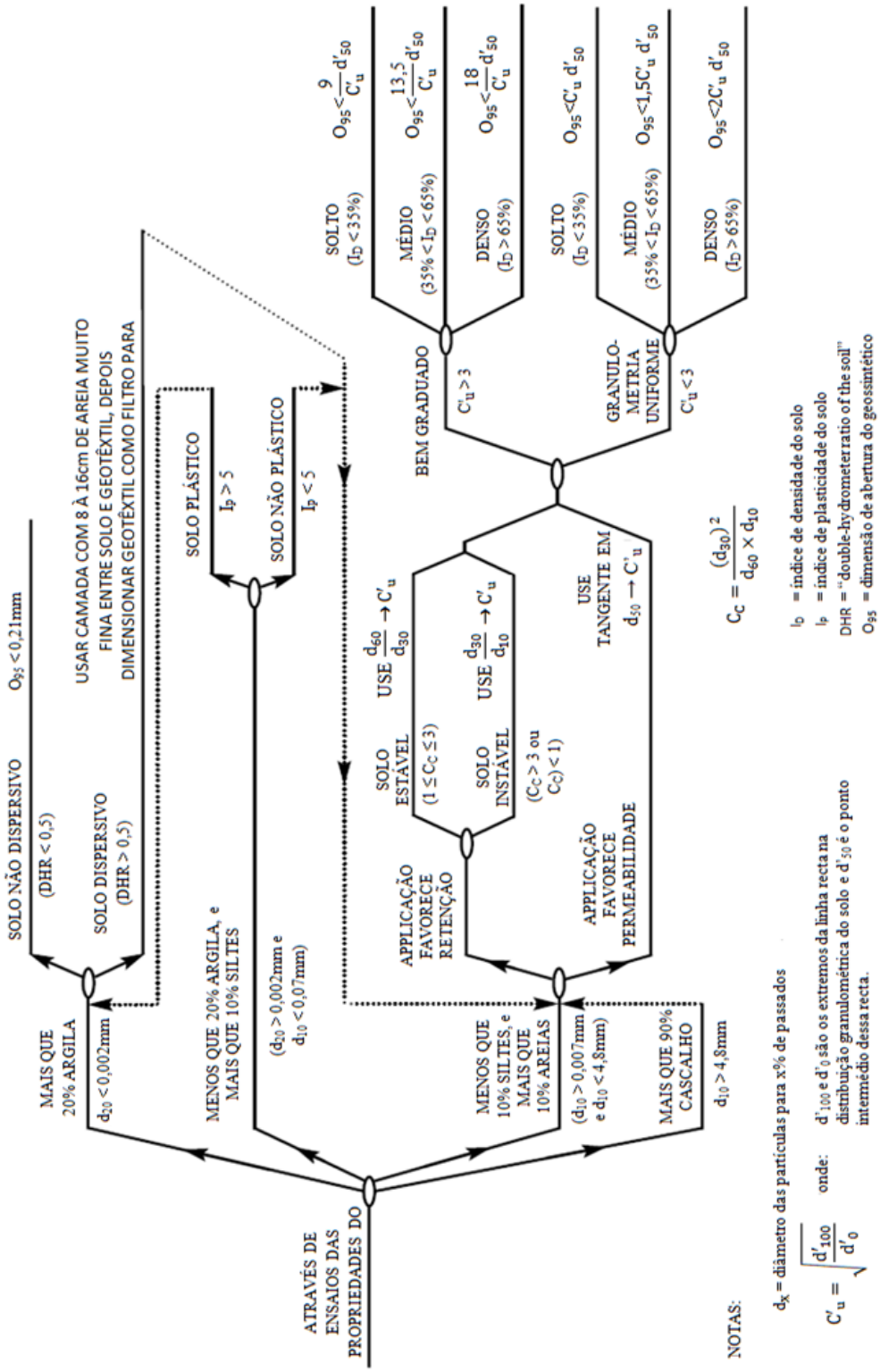


Figura 26. Critério de retenção do solo para condições hidráulicas estáticas [Mirafi (2010)].

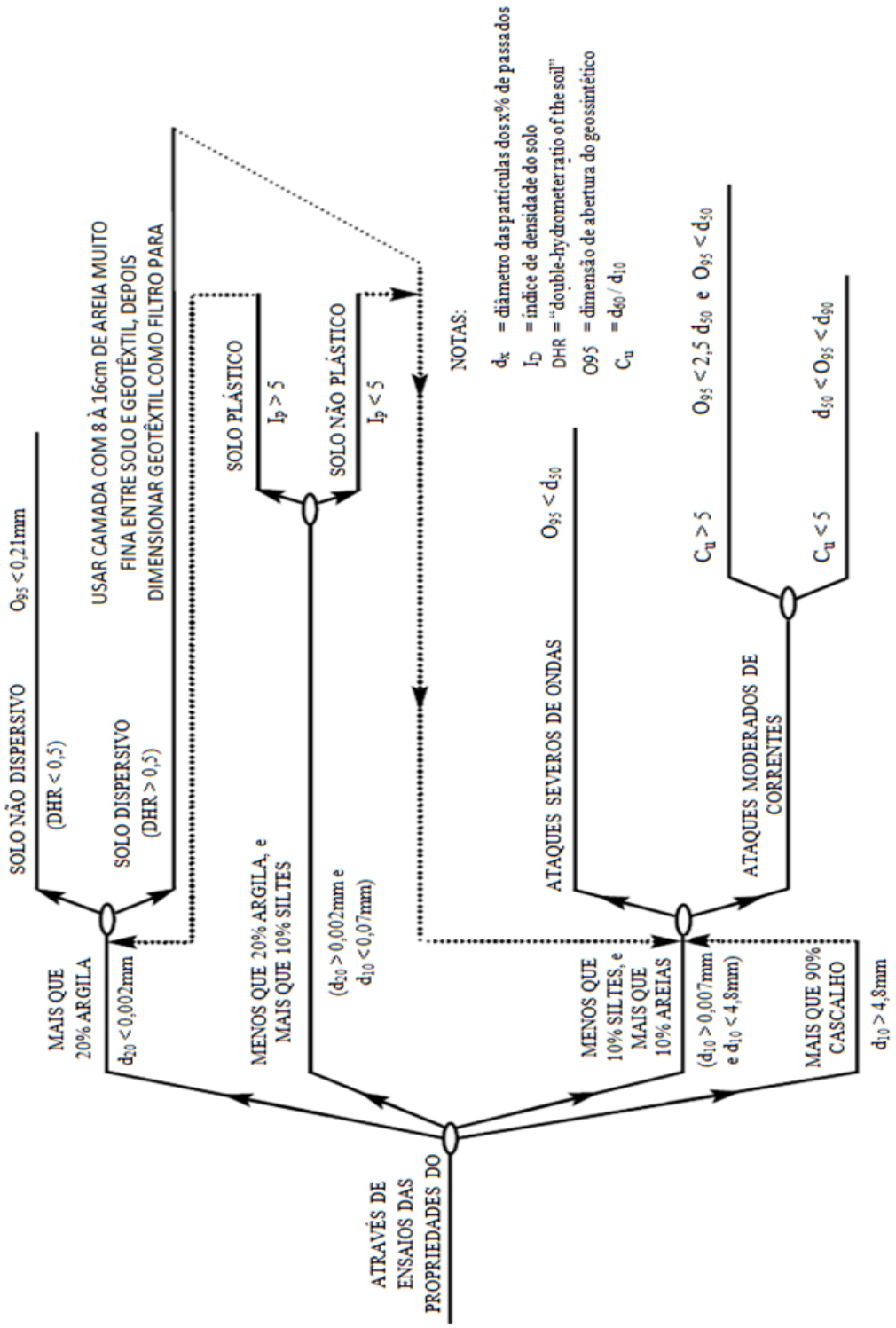


Figura 27. Critério de retenção do solo para condições hidráulicas dinâmicas [Mirafi (2010)].

Estes métodos são baseados no critério de permeabilidade de Terzaghi, mas para este funcionar, é necessário compreender as condições que rodeiam o filtro, o fluxo hidráulico e as características do solo. Mlynarek (1998b) refere processos de selecção de geotêxtil relativamente ao fluxo hidráulico. Deve-se ter em conta a granulometria do solo e o seu índice de plasticidade (I_P):

$$I_P = W_L - W_P \tag{13}$$

Sendo que W_L é o limite de liquidez e W_P é o limite de plasticidade. O índice de plasticidade deve ser expresso em percentagem (inteira). Quando não for possível determinar o limite de liquidez ou o de plasticidade, ou se for obtido W_P maior ou igual a W_L, anotar o índice de plasticidade como NP, ou seja, não plástico.

Assim, estes processos permitem achar uma gama de dimensões de aberturas de filtragem para o geotêxtil. Este processo de selecção de um geotêxtil para diferentes fluxos hidráulicos é ilustrado nos fluxogramas, na Figura A - 1 para fluxo bidireccional, e Figura A - 2 para o fluxo unidireccional, encontradas em anexo.

Pode-se dizer que os dois critérios, colmatação e porosidade, estão directamente ligados. Pois um geotêxtil deve possuir aberturas, uma porosidade suficiente para a passagem de água quando ocorre a colmatação, indiferente do fluxo hidráulico instalado. Assim, ambos são critérios importantes e têm influência sobre a permeabilidade do filtro.

Logo, é importante conhecer o número de aberturas por unidade de área do geotêxtil (N_o), derivado da Equação (8), mas agora para um geotêxtil [Giroud (2010)]:

Para um geotêxtil tecido:

$$N_o \approx \frac{A_R}{O_f^2} \tag{14}$$

Em que A_R é a área de abertura relativa, $A_R \geq 0{,}1$. E para não tecidos:

$$\frac{\left(1-\sqrt{1-n}\right)^2}{O_f^2} \leq N_o \leq \frac{4\left(1+0{,}4n-\sqrt{1-n}\right)^2}{\sqrt{3}O_f^2} \tag{15}$$

Em que n é a porosidade do geotêxtil não tecido, $n \geq 0{,}55$.

Num filtro geotêxtil não tecido, o critério de espessura é importante para o seu desempenho, sendo este irrelevante em geotêxteis tecidos. De modo a compreender a espessura deve-se compreender o conceito de constrição. Uma partícula de solo atravessa o filtro pelas aberturas das fibras, estas aberturas são constrições. Relaciona-se directamente a constrição com a espessura uma vez que quanto maior for a espessura, maior o número de constrições, pois quanto maior a distância que uma partícula do solo tem de percorrer, mais constrições deverá passar [Giroud (2010)].

A Figura 28 ilustra este critério de espessura, incluindo o conceito de constrição e a passagem das partículas por contrições para um geotêxtil com um t_{GTX} de espessura.

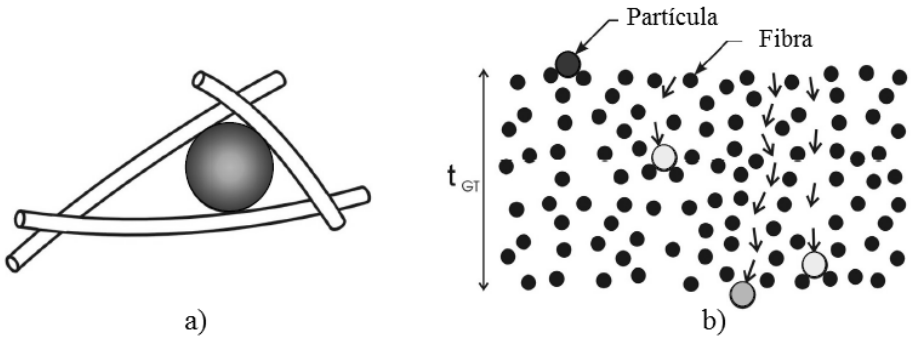


Figura 28. Critério de espessura: a) constrição, b) passagem de partículas [Giroud (2010)].

Define-se assim para um geotêxtil não tecido, o limite de espessura como o número de constrições:

$$N_{constrições} \approx \frac{\mu_{GTX}}{\rho_f d_f \sqrt{1\text{-}n}} \geq 25 \qquad (16)$$

Em que μ_{GTX} é a massa por unidade de área do geotêxtil, ρ_f é a massa volúmica das fibras, n é a porosidade do geotêxtil e d_f é o diâmetro das fibras.

Lafleur (1999) propõe um critério de selecção de filtro através de ensaios de identificação do solo base, ilustrado na Figura 29.

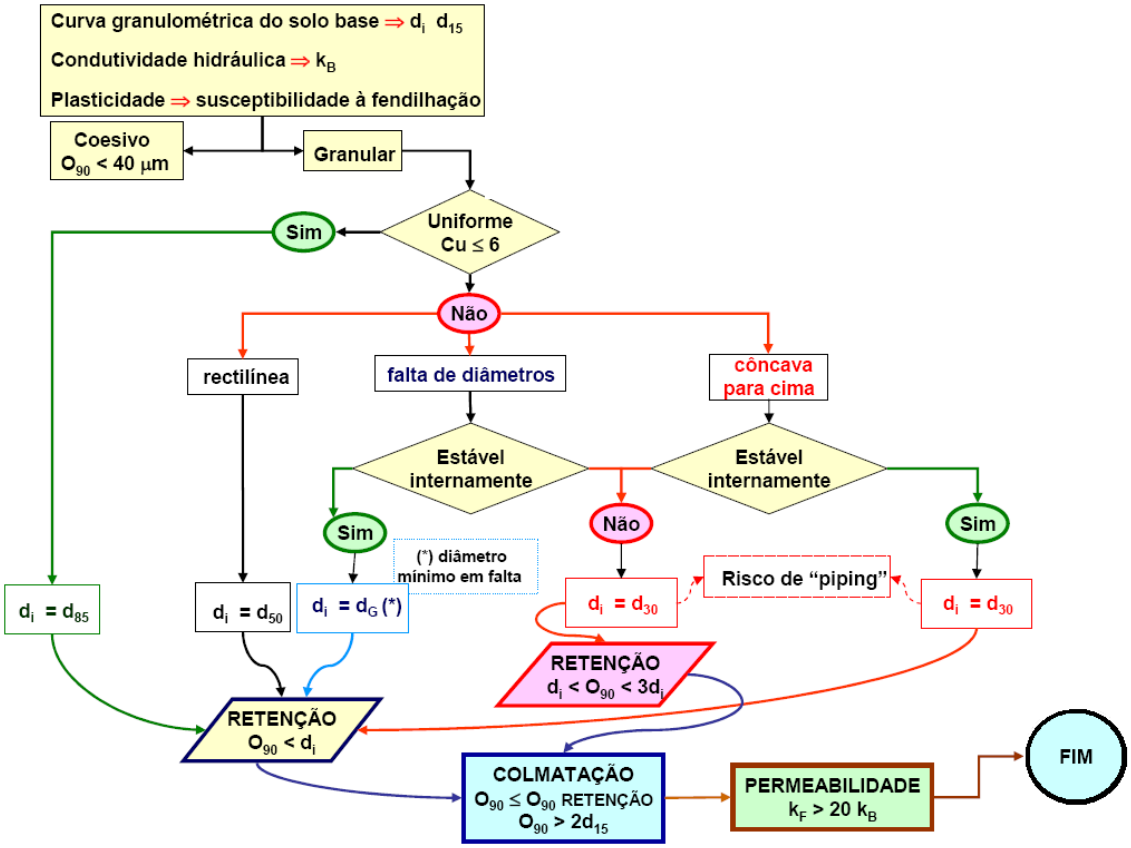


Figura 29. Critério de selecção de filtro [Lafleur (1999) citado por Pinho-Lopes (2009b)].

É importante que o geotêxtil não sofra danificações durante a sua instalação em obra. Para garantir que este fenómeno não é relevante, podem usar as classes de sobrevivência referidas por Fannin (2004). Salienta-se que estes valores variam, dependendo da classe do geotêxtil, ou seja, da importância que tem relativamente: classe 1, o mais resistente, e classe 3, o menos resistente. Portanto, uma vez que um geossintético que tem como função de filtragem, não em termos de segurança ou reforço estrutural, pode-se considerar como geotêxteis de classe 3.

O Quadro 6, em anexo, ilustra os valores de resistência para diferentes ensaios, ou seja para diferentes acções mecânicas.

Quadro 6. Critério de Sobrevivência [Fannin (2004)].

			Classe do geotêxtil					
			Classe 1		Classe 2		Classe 3	
			Extensão		Extensão		Extensão	
	Ensaio	Unidade	<50%	≥50%	<50%	≥50%	<50%	≥50%
Resistência "grab"	ASTM D 4632	N	1400	900	1100	700	800	500
Resistência das costuras	ASTM D 4632	N	1260	810	990	630	720	450
Resistência ao rasgamento	ASTM D 4533	N	500	350	400	250	300	180
Resistência ao punçoamento	ASTM D 4833	N	500	350	400	250	300	180
Resistência ao rebentamento	ASTM D 3786	kPa	3500	1700	2700	1300	2100	950

Como se tem investigado, geralmente (para condições comuns, em que estão confinados em solo) os geossintéticos cumprem os critérios de durabilidade, sejam eles ataques químicos, biológicos, variações de temperatura e exposição aos raios ultravioletas (UV). Existem alguns métodos de verificação, quanto às acções químicas e quanto à exposição aos raios, normalmente ensaios acelerados UV. Em geral, os filtros geotêxteis estão confinados em solo, logo, caso a sua instalação em obra seja rápida, este perigo é desprezável. No entanto, ainda pode ser sujeito a ataques químicos e exposição a temperaturas.

Baseado em estudos realizados por Cooke e Rebenfeld (1988), Lawson e Curiskis (1985) e Zanten (1986), o Quadro 7 ilustra uns critérios gerais de estabilidade química e térmica de polímeros.

Quadro 7. Critério de estabilidade química e térmica de polímeros [adaptado de G.E.O.H.K. (1993)].

	Resistência a		Estável entre
Tipo de polímero	Condições ácidas	Condições alcalinas	(ºC)
Polipropileno	pH ≥ 2	Todos	-15 a 120
Poliéster	pH ≥ 3	pH ≤ 10	-20 a 220
Poliamida	pH ≥ 3	pH ≤ 12	-20 a 230
Polietileno	pH ≥ 2	Todo	-20 a 80

3.3. Síntese dos critérios de dimensionamento

O critério de retenção deve ter em conta a estabilidade interna do solo que depende do seu coeficiente de uniformidade (C_u) e do índice de compacidade (I_P). Este critério pode ser aplicado para ambos, filtros geotêxteis e granulares, apesar de para filtros granulares este critério de retenção ser aplicado independentemente do C_u [Giroud (2010)].

O critério de permeabilidade deve cumprir dois requisitos: a pressão hidráulica nas aberturas e o fluxo hidráulico. O requisito da pressão hidráulica depende do gradiente hidráulico na vizinhança do filtro. Pois dependendo deste gradiente, para filtros geotêxteis, tanto um requisito como outro pode ser mais significativo. No entanto, em filtros granulares, o fluxo hidráulico geralmente é mais influente [Giroud (2010)].

Relativamente à porosidade, todos os filtros devem possuir um número suficiente de aberturas por unidade de área, assim minimizando a concentração de fluxo na interface solo-filtro, causando o deslocamento das partículas do solo e por sua vez, provocando a colmatação do filtro - critério de porosidade. Este critério é expresso como o mínimo de porosidade, para geotêxteis não tecidos, ou a mínima área de aberturas para geotêxteis tecidos. Para filtros granulares, este critério não é necessário uma vez que estes possuem uma porosidade suficiente [Giroud (2010)].

No que diz respeito à espessura, sabe-se que as partículas do solo se movem pelo filtro através de aberturas designadas de constrições. A dimensão característica de abertura de um geotêxtil não tecido depende da espessura, logo este deve ser suficientemente espesso para conter pelo menos 25 constrições no trajecto de uma partícula que passa pelo filtro. Os filtros granulares, por norma, contêm um número elevado de constrições devido às restrições construtivas, logo o critério de espessura é desprezável [Giroud (2010)].

3.4. Filtros granulares *versus* filtros geotêxteis

Existem algumas diferenças concretas entre filtros granulares e filtro geotêxteis, no entanto, existem também muitas semelhanças. Estes podem ser ao nível do desempenho como ao nível do dimensionamento. Uma análise crítica destas diferenças e semelhanças entre os tipos de filtros, leva a que se opte por um método ou outro. Hoje em dia, a opção mais comum é a de usar um filtro geossintético (em geral, geotêxtil), uma vez que demonstra uma diferença favorável na maior parte dos casos e verificações.

O Quadro 8, lista algumas semelhanças e diferenças entre um filtro granular e em geotêxtil.

Quadro 8. Semelhanças e Diferenças Pinho-Lopes (2009b).

	Agregados	Geossintéticos
Semelhanças		
-Riscos de colmatação interna por 1. partículas finas do solo a filtrar 2. actividade de bactérias aeróbias (colmatação ocre) 3. precipitação de sais 4. cristais de gelo		
Diferenças		
- Espessura	Elevada (>150mm)	Baixa (<30mm)
- Porosidade	25-40%	75-95%
- Capilaridade, h_c	Importante (h_c<500mm)	Baixa (h_c<50mm)
- Resistência à tracção	Não tem	Baixa a elevada
- Compressibilidade	Desprezável	Média a elevada
- Transmissividade sob tensão de confinamento	Constante	Variável
- Uniformidade	Gradualmente variável	Controlada através da massa por unidade de área e da espessura
- Durabilidade	Inerte	Sensível as radiações UV
- Instalação	Evitar a contaminação pelo solo envolvente	Deve ser instalado em contacto íntimo com o solo a filtrar
	Compactação	A instalação é facilitada pela costura das juntas
-Risco de danificação	Não tem	Sensível ao punçoamento e ao rasgamento

4. SELECÇÃO DE MÉTODOS E FILTROS

4.1. Métodos de dimensionamento

O dimensionamento de um filtro deve começar pela importância da sua aplicação. Deve-se conhecer os riscos e as consequências no caso de o filtro não funcionar [Christopher (1998) citado por Mlynarek (2000)].

Há quase um século que se têm desenvolvido métodos de dimensionamento de filtros, sendo Terzaghi o primeiro, em 1922, para filtros granulares. Todos estes têm o objectivo de cumprir os critérios e requisitos impostos. No entanto, apesar de existir um número elevado de métodos, existem ainda assim casos de insucesso em obras. Mesmo ao fazer um dimensionamento usando um método que tem produzido resultados positivos no passado, existe sempre a probabilidade de não ter sucesso. Portanto, quando se faz um dimensionamento, devem-se utilizar vários métodos, avaliar a fiabilidade desses métodos, assim diminuindo a probabilidade de fracasso, obtendo resultados fiáveis e eficazes.

4.2. Critério de selecção

Como objectivo principal deste trabalho, pretende-se criar uma ferramenta numérica para o dimensionamento de um filtro, seja granular ou geotêxtil. O dimensionamento é baseado em métodos existentes, mas uma vez que existe um número elevado de métodos, só alguns são escolhidos para serem implementados na ferramenta numérica, pois a tentativa de implementar todos os métodos seria quase impossível e desnecessária uma vez que não é esse o objectivo deste trabalho.

Assim, criou-se um critério de selecção de métodos de dimensionamento onde, através de alguns parâmetros, foram escolhidos os métodos que cumprem este critério. A Figura 30 demonstra os parâmetros e a ordem de importância destes considerados.

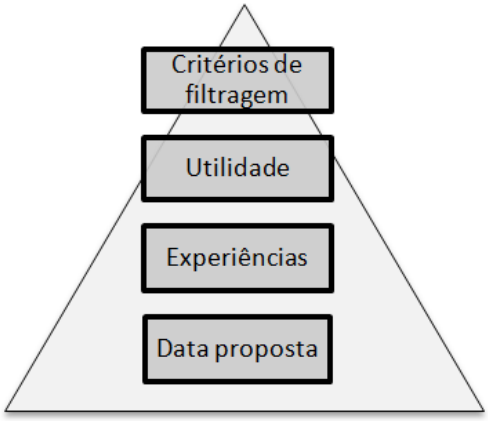


Figura 30. Hierarquia dos parâmetros do critério de selecção utilizadas.

O parâmetro mais importante é se o método cumpre os critérios de filtragem, isto é, se faz referência aos critérios principais para a função de um filtro, a permeabilidade e a retenção.

O método deve ser útil para os casos gerais, ou seja, não sendo um método limitado a um caso específico ou uma condição específica, pois assim possui mais utilidade para o projectista do filtro. Um método muito utilizado pode ser avaliado com maior eficácia, contribuindo assim para a sua validade, admitindo que este se prove um sucesso.

Como se referiu em 2.4, um ensaio é tão valido quanto a sua aplicação na realidade, pois isto também se aplica para os métodos de dimensionamento. Logo, o método deve ter alguma experiência na realidade (ou seja, de aplicação prática dos resultados obtidos) e, por sua vez, ser aceite por alguma organização ou sociedade certificada.

Por fim, escolhe-se os métodos relativamente à data da proposta. Um método praticado há muito tempo pode ser avaliado com maior eficácia do que um método praticado a pouco tempo. Assim, dá-se maior validade a um método mais antigo, se este demonstrar casos de sucesso. Aproveitando o parâmetro das datas da proposta, escolheram-se métodos de diversas datas, desde os mais antigos até aos mais recentes, a fim de fazer uma análise da evolução dos mesmos.

O Quadro 9 contém a lista de métodos escolhidos para implementar na ferramenta numérica.

Quadro 9. Listagem dos métodos escolhidos.

Filtros Granulares		Filtros Geotêxteis	
Terzaghi	1922	German Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering	1986
Bertram	1940		
US Waterways Experiment Station	1953	French Comittee on Geotêxtiles and Geomembranes	1989
US Bureau of Reclamation	1955	Federal Highway Administration	1998
Sherard *et al.*	1984		
Geotechnical Engineering Office of Hong Kong	1993	Mlynarek	1998
Giroud	2010	Giroud	2010

Nas secções seguintes são descritos os métodos listados no Quadro 9 e é feita uma composição da metodologia de implementação destes métodos na ferramenta numérica. No caso de filtros granulares, secção 4.3, esta implementação consiste de aplicação de fórmulas directas. No caso de filtros em geotêxtil, secção 4.4, é apresentado uma série de fluxogramas e processos de selecção de opções e condicionantes.

4.3. Métodos para filtros granulares

4.3.1. Terzaghi

Este método, proposto por Karl von Terzaghi em 1922 [Terzaghi (1922)], é um dos métodos mais antigos e mais utilizados no que se refere aos filtros granulares e é baseado em experiências. Serviu como base de muitos métodos e desenvolvimentos, incluindo os de filtros geotêxteis. É relativamente simples e eficaz, no entanto é limitado a solos não coesivos [Terzaghi (1922)].

A Equação (1) demonstra o critério de retenção e a Equação (2) corresponde ao critério de permeabilidade. Na ferramenta numérica é utilizado o factor 4 em vez de 5 porque a diferença entre estes não é significativa, assim adopta-se o valor mínimo, e por sua vez está-se no lado de segurança.

Teoricamente, este método ainda considera que as dimensões das partículas do filtro são relativamente uniformes.

4.3.2. Bertram

Proposto por Bertram (1940), este método Bertram (1940) é baseado nos critérios do Terzaghi (1922), pois, utiliza a mesma correspondência da dimensão das partículas, ou seja, 15% de passados do agregado que constitui o filtro e d_{85} e d_{15} que representam, respectivamente, 85% e 15% das partículas do solo base que passaram no processo de peneiração. No entanto difere no que relativamente aos factores, considerando ainda o coeficiente de uniformidade, é limitado a uma gama de valores do gradiente hidráulico.

$$D_{15} \leq 6{,}5d_{85} \tag{17}$$

$$D_{15} \leq 9d_{15} \tag{18}$$

As Equações (17) e (18) correspondem ao critério de retenção e são limitados para um gradiente hidráulico entre 8 e 20.

$$C_u \leq 1{,}2 \tag{19}$$

Relativamente ao coeficiente de uniformidade na Equação (19), condiciona a utilização deste método para um solo base uniforme e não coesivo. O mesmo aplica-se para o material granular usado como filtro.

4.3.3. US Waterways Experiment Station

Este método, criado pelo US Army Corps of Engineers em 1953, tem em conta as mesmas considerações que Bertram (1940) mas com condicionantes relativamente ao critério de retenção [U.S.C.E. (1953)]. Este método pode ser aplicado quando se encontra um gradiente hidráulico entre 1 e 26 e considera ainda d_{50}, ou seja, 50% das partículas do solo base que passaram no processo de peneiração.

$$D_{15} \leq 5d_{85} \tag{20}$$

$$D_{15} \leq 20d_{15} \tag{21}$$

$$D_{15} \leq 25d_{50} \tag{22}$$

As Equações (20), (21) e (22) referem-se ao critério de retenção nos casos gerais mas existem algumas excepções que dependem do valor de C_u do solo base. Assim, quando este coeficiente é limitado, o factor é alterado. O Quadro 4 apresenta estas modificações. No entanto o C_u é limitado entre 1,2 e 6,1 para o solo base, e entre 2 e 23 para o material que constitui o filtro.

$$D_{15} \geq 5d_{15} \tag{23}$$

A Equação (23) refere-se ao critério de permeabilidade, que é independente do valor do C_u, desde que se encontre dentro do intervalo indicado.

4.3.4. US Bureau of Reclamation

Este método americano, proposto em 1955, considera o tipo de material que constitui o filtro. Assim, o dimensionamento não só é condicionado pelo C_u, mas depende do material que se pode utilizar como filtro, incluindo alguns requisitos adicionais, dividindo este método em três casos.

$$D_{50} \leq \mathrm{C}d_{50} \tag{24}$$

$$D_{15} \leq \mathrm{C}d_{15} \tag{25}$$

No caso de um filtro constituído por material uniforme, considere-se o C_u deste entre 1,2 e 1,4. Ainda, o C_u do solo base neste caso, deve ter um valor de 1,4 e 7. Nestas condições, o dimensionamento é feito utilizando a Equação (24), em que C pode variar entre 5 e 10.

Se o filtro for constituído por material graduado, ou seja com o C_u entre 5 e 30, aplica-se a Equação (24), com C entre 12 e 58, e a Equação (25) com C entre 12 e 40.

Quando se pretende dimensionar um filtro com material britado, o C_u não é um condicionante. Aplicam-se igualmente as Equações (24) e (25) com os valores de C entre 9 e 30 e entre 6 e 18, respectivamente.

Relativamente aos valores de C, considera-se o valor mínimo como um sobredimensionamento, ou seja, do lado de segurança. Portanto, este valor pode depender da obra, caso seja uma obra de condições severas, deve-se considerar o C mínimo, caso contrário, o valor máximo é suficiente.

No entanto, o dimensionamento de qualquer caso deve incluir os seguintes requisitos:

1. $D_{100} < 75$mm;
2. As curvas granulométricas do solo base e do filtro devem apresentar uma forma semelhante;
3. Solo base apenas para partículas com dimensão menor que 4,76mm.

4.3.5. Sherard *et al.*

Sherard *et al.* (1984a) realizaram uma série de experiências para avaliar a dimensão dos poros de um filtro de areia e brita relativamente ao D_{15}. Concluiu-se que um filtro actuava como um peneiro eficaz quando este possuía aberturas com dimensões de $0{,}11D_{15}$. Também se verificou que, relativamente à permeabilidade, os agregados angulares são tão eficazes como os agregados de partículas arredondadas, assim a granulometria do solo base e do filtro não necessitam de ser semelhantes. Consideram-se duas situações para o dimensionamento: 1) quando o solo base consiste de um solo uniforme, $C_u < 5$; e 2) quando este é bem graduado, com curva granulométrica contínua.

$$D_{15} \geq Cd_{15} \tag{26}$$

Em que C = 5 quando o solo base é uniforme, e C = 9 quando é bem graduado. É ainda exigido que o C_u do filtro, para ambas as situações, esteja entre 1,1 e 4,4 e que não possua uma quantidade significativa de partículas com dimensão menor que 0,075 mm.

4.3.6. Geotechnical Engineering Office of Hong Kong

Uma parte do documento G.E.O.H.K. (1993), faz um estudo sobre o dimensionamento e construção de filtros granulares que podem ser aplicados em taludes e muros de retenção na cidade de Hong Kong. Assim, é apresentado um método de dimensionamento baseado em vários métodos diferentes. Segundo este documento, o dimensionamento deve cumprir três requisitos; estabilidade, permeabilidade e segregação.

De modo a cumprir os requisitos, são estabelecidas seis regras:

1. $D_{15} < 5d_{85}$
2. O solo base não deve possuir uma granulometria descontínua.
3. $D_{15} > 5d_{15}$
4. Não deve passar mais que 5% no peneiro 0,063mm e essa fracção deve ser não coesiva.
5. $4 < C_u < 20$
6. A dimensão máxima das partículas não deve ser maior que 50mm.

As regras 1 e 2 cumprem o requisito de estabilidade, as regras 3 e 4 o de permeabilidade e as regras 5 e 6 referem-se ao requisito de segregação.

No entanto existem algumas observações, tais como no caso em que o solo base possui granulometria ampla. Caso a curva granulométrica original tenha d_{90} > 2mm e d_{10} < 0,06mm, este critério deve ser aplicado para a curva granulométrica alterada, que apenas inclui as partículas com dimensão menores que 5mm. A espessura do filtro deve ser menos que 300mm para uma instalação manual, ou 450mm para instalação com equipamento mecânico. A regra 5 deve ser usada para verificar a curva granulométrica do filtro individual e não como uma limitação do dimensionamento. Por fim, em G.E.O.H.K. (1993) é referido que a determinação da distribuição da dimensão das partículas do solo base e do filtro deve ser realizado sem utilizar dispersantes, relevante no caso dos solos saprolíticos de Hong Kong.

4.3.7. Giroud

O método de Giroud (2010) faz uma modificação dos critérios anteriormente implementados pelo autor, Giroud (1981), baseados nos princípios de Terzaghi. No entanto, o método de Terzaghi é limitado a solos não coesivos com o C_u baixo. Assim, Giroud adoptou os mesmos métodos baseados nas investigações da estabilidade interna do solo, o que tornou possível aplicar os mesmos critérios de retenção de Terzaghi, independentemente do valor de C_u, mas dependendo do índice de compacidade (I_D). Quanto à permeabilidade, o requisito de fluxo hidráulico deve ser cumprido, sendo este idêntico ao critério de permeabilidade de Terzaghi. Relembra-se ainda que as dimensões das partículas são obtidas através de uma truncagem da curva granulométrica, como ilustrado na Figura 24.

Segundo Giroud (2010), o critério de retenção é dividido em dois casos: 1) quando as partículas coesivas formam espaços vazios que captam outras partículas ($C_u \leq 3$); ou 2) quando as partículas coesivas não contribuem para a captação de outras partículas ($C_u \geq 3$). A Figura 31 faz uma representação esquemática destes solos.

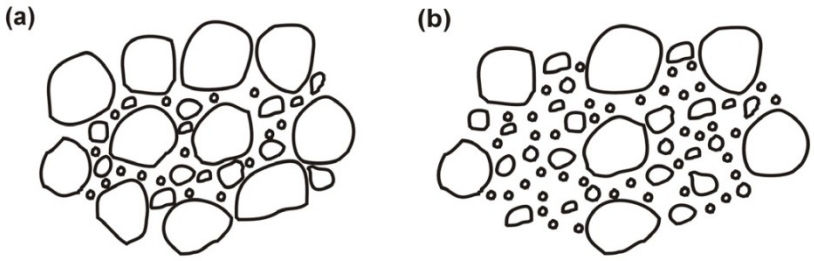


Figura 31. Representação esquemática dos solos. a) $C_u \leq 3$; b) $C_u \geq 3$ [Giroud (2010)].

Dentro destes casos, o critério depende da densidade do solo. Assim o solo pode ser denso ($I_D \geq 65\%$), moderadamente denso ($35\% \leq I_D < 65\%$) ou solto ($I_D \leq 35\%$). O Quadro 5 demonstra as equações para as diferentes condicionantes, onde O_f é equivalente a D_{15}.

A verificação do grau de fluxo é, no caso de filtros granulares, o suficiente para verificar a permeabilidade. Uma vez que esta é igual à de Terzaghi, aplica-se a Equação (2) e a espessura do filtro deve ser de 250 a 2500mm.

4.4. Métodos para filtros geotêxteis

4.4.1. German Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (GSSMFE)

Este método, aqui designado por GSSMFE, resulta do trabalho realizado por Heerten (1986), pois é um método baseado em engenharia costeira e experiências de protecção costeira [G.E.O.H.K. (1993)]. O dimensionamento de um filtro geotêxtil é dado em D_w, isto é a dimensão de abertura obtida por peneiração (via húmida) usando equipamentos modificados de peneiros vibratórios e uma areia bem graduada. Logo, a base de estudo deste método leva a que seja um método ideal para aplicações severas relativamente a presença de água, pois, em casos menos severos, os resultados obtidos serão conservativos.

As equações a utilizar para o dimensionamento dependem de características do solo base, a dimensão das partículas, se a sua curva granulométrica se encontra dentro da envolvente de solos problemáticos ou se apresentam uma coesão estável.

A dimensão das partículas do solo base é definida por três classes, A, B e C. Para a classe A, $d_{40} \geq 0{,}06$mm, para a classe B, $d_{15} < 0{,}06$mm e para a classe C, são os solos com a granulação mista. Assim, para cada uma das classes A e B, existem uma série de critérios de dimensionamento, onde os critérios para classe C são os mesmos da classe B.

Um solo problemático é definido por Heerten (1986), que apresenta um estudo sobre o tipo de solos que podem ser problemáticos para as obras. É apresentada uma envolvente no gráfico da curva granulométrica, onde define esta zona problemática. Em anexo, a Figura A - 3 é um exemplo desta envolvente realizada por Heerten (1986) e utilizada por G.E.O.H.K. (1993). Na ferramenta numérica, o utilizador define se o solo base da obra é problemático ou não, pois um solo que conte finos que podem entrar em suspensão facilmente também pode ser considerado problemático.

A última característica condicionante, a estabilidade coesiva tem aplicação para solos de classe A e deve apenas ser aplicada quando se estas propriedades coesivas do solo estão preservadas mesmo quando sujeito a cargas. Portanto, a Figura 32 demonstra o processo de dimensionamento da ferramenta numérica e as respectivas equações deste método para o critério de retenção.

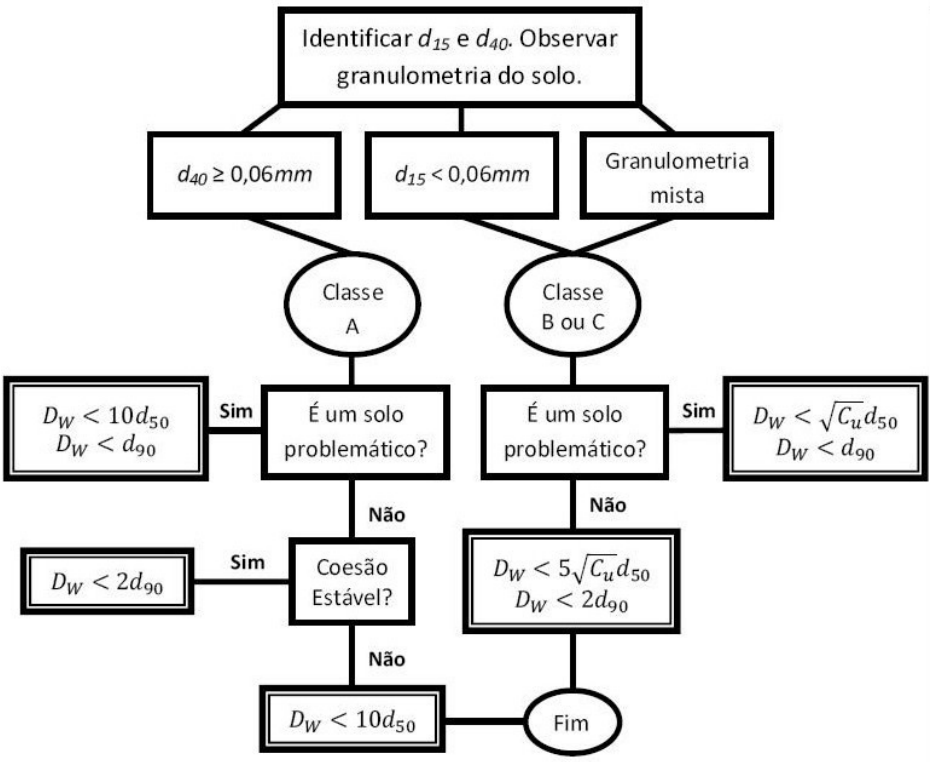


Figura 32. Fluxograma para verificação do critério de retenção do método do GSSMFE.

Uma vez verificado o critério de retenção, segue-se a Equação (27) que utiliza o coeficiente de permeabilidade do solo (k_S) para obter o coeficiente de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil (k_n).

$$k_n \geq 50k_S \tag{27}$$

4.4.2. French Committee on Geotextiles and Geomembranes (FCGG)

O método francês é em grande parte baseado em experiencia com geotêxteis agulhados, onde as aberturas dos poros podem ser reduzidas significativamente com compressão, assim deve-se optar por um geotêxtil não tecido agulhado e espesso quando se emprega este método [G.E.O.H.K. (1993)]. No entanto, é um método adequado para casos gerais uma vez que emprega maior parte dos parâmetros importantes [F.C.G.G (1989)].

O critério de retenção de filtragem relaciona a abertura de filtragem do geotêxtil obtida por peneiração hidrodinâmico (O_{95}) com o valor de d_{85}, com as condições fronteira,

ou seja, distribuição granulométrica, densidade e gradiente hidráulico e com a função do geotêxtil.

$$O_{95} < C_g \times d_{85} \tag{28}$$

Onde: $C_g = C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot C_4$

C_1 – coeficiente relativo ao gradiente hidráulico;

C_2 – coeficiente relativo à densidade do solo;

C_3 – coeficiente relativo à granulometria do solo;

C_4 – coeficiente relativo às funções do geotêxtil.

A Equação (28) constitui o critério de retenção para o caso de solos coesivos. No Quadro 10 apresentam-se os valores das variáveis e as condições de aplicação respectivas.

Quadro 10. Valores dos coeficientes e as respectivas condições de aplicação.

Coeficiente	Valor	Aplicação
C_1	1,00	Solos bem graduados e contínuos
	0,80	Solos uniformes e contínuos (Cu < 4)
C_2	1,25	Solos densos ($I_D \geq 65\%$) e confinados
	0,80	Solos soltos ($I_D < 65\%$) e não confinados
C_3	1,00	Gradientes hidráulicos, $i_S < 5$
	0,80	Gradiente hidráulico, $5 < i_S < 20$
	0,60	Gradiente hidráulico, $20 < i_S < 40$
C_4	1,00	Uso somente para filtragem
	0,30	Uso para filtragem e drenagem

Quando se trata de solos finos, onde o valor obtido da Equação (28) é inferior a 0,05mm, deve-se considerar O_{95} = 0,05mm.

Se os solos existentes são considerados solos problemáticos (por exemplo, areias com baixo teor em argilas), deve-se cumprir o critério da Equação (28) e esta abertura deve ser maior que quatro vezes o d_{15}, ou seja, o resultado demonstrado pela Equação (29).

$$4 \cdot d_{15} < O_{95} < C_g \cdot d_{85} \tag{29}$$

Eventualmente no caso em que a curva granulométrica seja descontínua, deve-se utilizar o lado mais fino para o dimensionamento [Muñoz (2005)].

A filtragem de solos dispersivos ou solos em suspensão não está incluída no campo de aplicação deste critério de retenção, sendo a escolha do geotêxtil satisfatório realizada através de ensaios de desempenho [Muñoz (2005)].

O critério de permeabilidade deste método relaciona a permissividade do geotêxtil (ψ) com a permeabilidade normal ao plano do solo (k_n), ou seja, onde a direcção da agua que atravessa o geotêxtil é perpendicular ao plano do geotêxtil. Assim, Equação (30) refere a condição que o geotêxtil deve obedecer.

$$\psi < A_g \cdot k_S \tag{30}$$

$$\psi = k_n / t_{GTX} \, (s^{-1}) \tag{31}$$

Onde A_g é o coeficiente dimensional para permeabilidade. Este pode tomar valores diferentes dependendo do tipo de obra, pois para estruturas de risco elevado (barragens de terra) onde os gradientes são elevados, $A_g = 10^5$. No entanto pode ser 10^4 para estruturas normais (taludes, valas de drenagem) onde tem gradientes baixos e solos de permeabilidade baixa. Quando se trata de solos limpos com d_{12} < 0,08mm e gradientes baixos, este coeficiente pode ser considerado igual a 10^3. O t_{GTX} representa a espessura do geotêxtil.

A Figura 33 e a Figura 34 representam os critérios de retenção e permeabilidade, respectivamente. Estes foram os fluxogramas usados para implementar os processos de dimensionamento na ferramenta numérica.

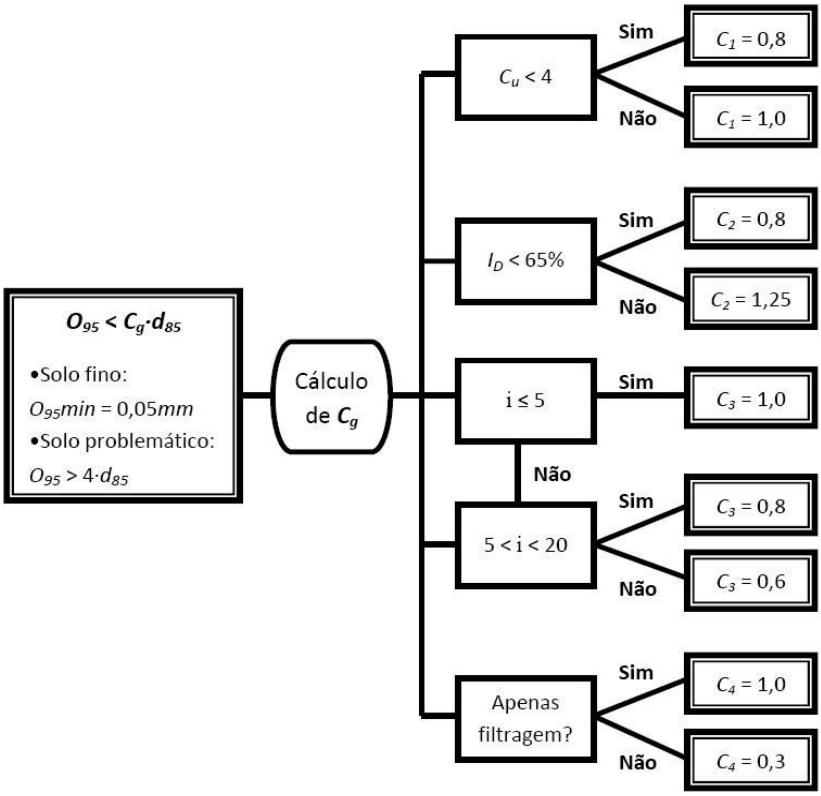


Figura 33. Fluxograma para implementação do critério de retenção do método do FCGG.

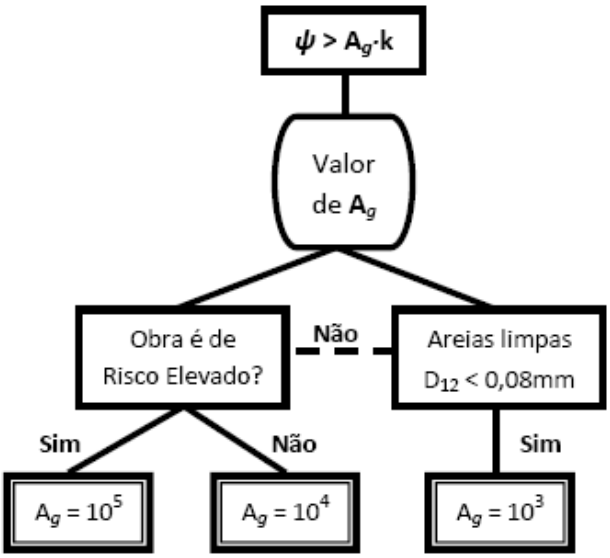


Figura 34. Fluxograma para implementação do critério de permeabilidade do método do FCGG.

4.4.3. Federal Highway Administration

Este método é baseado em vários estudos realizados por diferentes autores, tais como Kenney e Lau (1985), Kenney e Lau (1986), Christopher e Holtz (1985), entre outros.

No documento F.H.W.A. (1998) é compilado um conjunto de métodos de modo a fazer o dimensionamento de um filtro geotêxtil.

Quanto à capacidade de retenção, o critério de FHWA apresenta propostas distintas de acordo com a percentagem de partículas finas na constituição granulométrica do solo. Para tal, é avaliado o d_{50} em relação ao peneiro nº 200 do A.S.T.M. (2009c), equivalente a 0,074mm. O Quadro 11 ilustra o critério de retenção estipulado por F.H.W.A. (1998).

Quadro 11. Critério de retenção do FHWA, adaptado de Muñoz (2005).

Solo	Critério	Aplicação
≤ 50% passando no peneiro 200	Fluxo permanente: $O_{95} \leq B \cdot d_{85}$	$B = 1 \rightarrow C_u < 2$ ou $C_u > 8$ $B = 0{,}5 \cdot C_u \rightarrow 2 < C_u < 4$ $B = 8/C_u \rightarrow 4 < C_u \leq 8$
	Fluxo dinâmico, fluxo em dois sentidos: $O_{95} \leq d_{15}$	—
> 50% passando no peneiro 200	Fluxo permanente: $O_{95} \leq d_{85}$	Geotêxteis tecidos
	$O_{95} \leq 1{,}8 \cdot d_{85}$	Geotêxteis não tecidos
	Fluxo dinâmico, fluxo bidireccional: $O_{95} \leq 0{,}5 \cdot d_{85}$	—

A estratégia geral do FHWA relativa ao critério de permeabilidade é especificar um geotêxtil com permeabilidade maior do que o do solo base, e verificar separadamente o risco de colmatação. Este método distingue ainda as aplicações em condições críticas/severas ou menos críticas/severas.

$$k_n \geq C \cdot k_S \tag{32}$$

A Equação (32) define a permeabilidade do geotêxtil, onde C é um coeficiente dimensional cujos valores são função do tipo de aplicação. Para situações não críticas, com baixos gradientes hidráulicos e solos estáveis, usa-se C = 1. Em situações críticas ou severas, com gradientes hidráulicos elevados e condutividade hidráulica dinâmica ou solos instáveis utiliza-se C = 10.

$$\psi \geq 0{,}5\ \text{sec}^{-1} \text{ para } d_{15} < 0{,}075\text{mm} \tag{33}$$

$$\psi \geq 0{,}2\ \text{sec}^{-1} \text{ para } d_{50} < 0{,}075\text{mm} \tag{34}$$

$$\psi \geq 0{,}2\ \text{sec}^{-1} \text{ para } d_{50} > 0{,}075\text{mm} \tag{35}$$

De acordo com a A.S.T.M. (1997), recomenda-se valores mínimos de permissividade do geotêxtil. Estes são representados em Equações (33), (34) e (35).

O FHWA ainda considera o critério de prevenção à colmatação, assim quando se trata de condições severas, deve-se aplicar o A.S.T.M. (2006). Calcula-se a razão entre gradientes (GR), que deve ser menor que 3. Por outro lado, quando se encontra em condições não severas, para um geotêxtil não tecido, a sua porosidade deve ser maior que 30%, e para um geotêxtil tecido, a percentagem de área aberta deve ser maior que 4%. Por fim, deve cumprir a Equação (36) quando $C_u > 3$.

$$O_{95} \geq 3 \cdot d_{85} \tag{36}$$

Em resumo, deve-se usar o critério de retenção e permeabilidade para o dimensionamento do filtro geotêxtil, e o critério de colmatação deve servir apenas como uma verificação do filtro escolhido sendo este critério baseado em Calhoun (1972).

A Figura 35 ilustra o processo de dimensionamento de um filtro geotêxtil segundo o método da FHWA. A ferramenta numérica criada aplica os critérios de retenção e permeabilidade para obter dados necessários para escolher um geotêxtil. Por último, uma vez que não tem dados sobre o geotêxtil escolhido pelo utilizador, apresenta as características do geotêxtil incluindo as propriedades necessárias para se verificar o critério de colmatação. O F.H.W.A. (1998) descreve detalhadamente, passo à passo, um processo de implementação deste método.

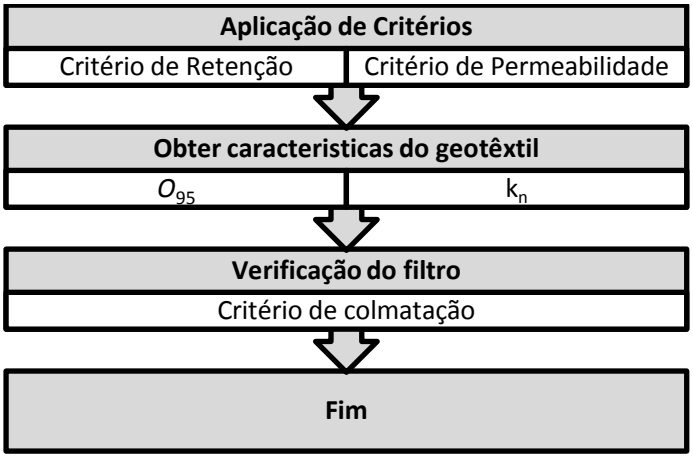


Figura 35. Processo de dimensionamento para o método do FHWA.

Este método ainda refere um critério de sobrevivência que se encontra no Quadro 6. A ferramenta numérica apenas dispõe este critério como uma recomendação, uma vez que esta propriedade do geotêxtil é apenas relevante para a durabilidade mas não é importante para o dimensionamento do filtro.

4.4.4. Mlynarek

Mlynarek (1998a) descreve um método de dimensionamento de um filtro geotêxtil Que inclui dois processos de selecção do filtro geotêxtil óptimo, para fluxos hidráulicos unidireccionais e bidireccionais, respectivamente. Ainda descreve a metodologia destes processos através de um esquema demonstrado na Figura 36.

A Figura 36 ilustra esquematicamente o processo de selecção de um filtro geotêxtil óptimo [Mlynarek (1998b)].

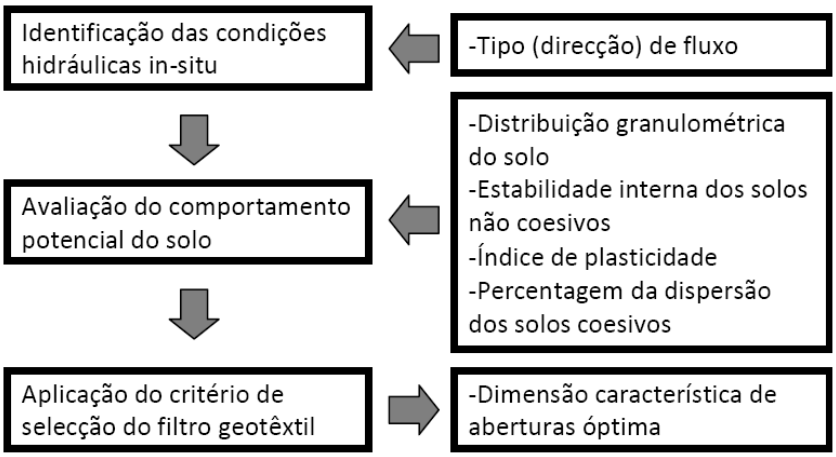


Figura 36. Processo de selecção de um filtro geotêxtil [adoptado de Mlynarek (1998b)].

Toda a metodologia de dimensionamento de filtros segundo Mlynarek foi descrita na secção 3.2.2. Assim, na secção presente apenas de descreve como se implementou o método na ferramenta numérica, ou seja, os, o critério de retenção e colmatação, representados em Figura A - 1 e Figura A - 2, e o critério de permeabilidade.

De modo a introduzir o processo de cálculo apresentado nos fluxogramas na ferramenta numérica, fez-se uma lista de soluções possíveis de filtro, e para cada uma, definiu-se os caminhos possíveis dentro das fluxogramas em Mlynarek (1998a). O quadro representa o conceito desta listagem de caminhos para uma solução.

Quadro 12. Quadro geral de representação de caminhos de selecção no método de Mlynarek.

Solução *		
Caminhos	*Passos*	*Condições*
Listagem de número de caminhos possíveis (A, B, C… Areia Fina)	1	Direcção de fluxo: • unidireccional ou bidireccional
	2	Determinação da granulometria do solo: • dimensão das partículas, d_m
	3	Circunstâncias relativas ao fluxograma: • condições de d_m • índice de plasticidade, I_P • dispersão do solo, D • tipo de condições hidráulicas • coeficiente de uniformidade, C_u
	*	* Necessidade de uma camada de areia fina No caso de necessidade de areia fina, fazer

	dimensionamento para este de mesmo modo, seguindo o fluxograma.

Assim, em anexo estão listadas as soluções e as respectivas condicionantes: o Quadro A - 1 refere as condições para um fluxo bidireccional, e Quadro A - 2 para um fluxo unidireccional. Com estes quadros, cumprem-se os critérios de retenção e de colmatação.

Relativamente à permeabilidade, este método baseia-se no critério de Giroud (1996), onde se utiliza a Equação (32), onde C difere, dependendo do tipo de obra, e cujos valores são representados no Quadro 13.

Quadro 13. Valores de C para o critério de permeabilidade do método de Mlynarek.

Valor de C	Tipo de Obra
10	Valas usuais
20	Dreno de pé em barragem
100	Núcleos argilosos em barragens

4.4.5. Giroud

Actualmente, este autor é um dos mais reconhecidos protagonistas no âmbito de geossintéticos. Giroud (2010) apresenta um método de dimensionamento de filtros geotêxteis.

Como já se mencionou no estudo de filtros granulares, o desenvolvimento deste método baseia-se nos princípios de Terzaghi. É demonstrado em Giroud (2010) que são necessários quatro critérios para o dimensionamento de um filtro geotêxtil, estes são: o critério de retenção, o critério de permeabilidade, o critério de porosidade e o critério de espessura.

A análise do critério de permeabilidade inclui dois requisitos, a pressão de água nos poros e a razão de fluxo hidráulico. É demonstrado em Giroud (2010) como a presença de um filtro aumenta a pressão de água nos poros a montante do mesmo. No entanto, aumentando o valor da condutividade hidráulica do filtro (k_f), há uma diminuição dos valores excessos de pressão de água nos poros gerados. Assim, aplicando a Equação (37), assegura-se que a presença do filtro não vai aumentar a pressão de água nos poros.

$$k_f \geq i_S k_S \tag{37}$$

Onde i_S é o gradiente hidráulico do solo junto ao filtro e k_S é a condutividade hidráulica do solo.

A Figura 37 demonstra este conceito de pressão de água nos poros, ilustrando três casos: a) sem o filtro; b) com o filtro mas sem o i_S; c) com o filtro, mas cumprindo o critério.

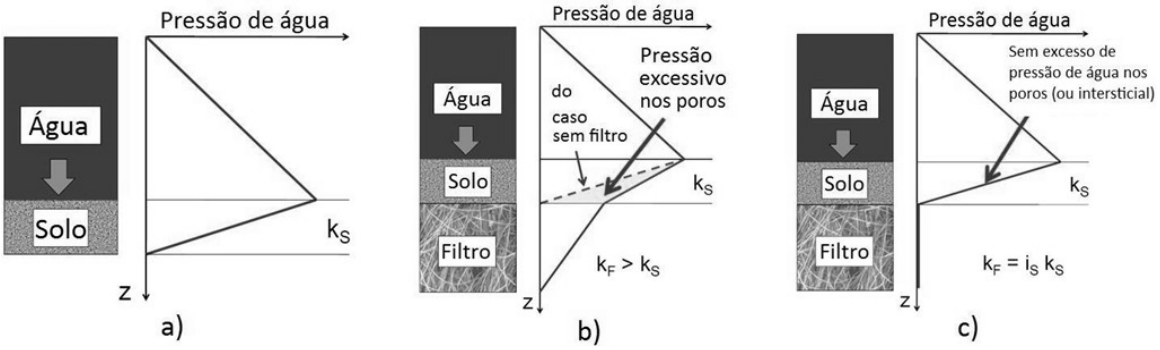


Figura 37. Pressão de água nos poros: a) sem o filtro; b) com o filtro, mas sem o i_S; c) com o filtro, mas cumprindo o critério [Giroud (2010)].

O requisito de fluxo de água baseia-se nas equações da lei de *Darcy* que demonstram que quando presente um filtro, existe uma redução na velocidade do fluxo menos que 10%. Assim, de modo a assegurar o fluxo, a condutividade hidráulica do filtro (k_f) deve ser maior ou igual à condutividade hidráulica do solo (k_S).

$$k_f \geq \max\,(i_S k_S,\, k_S) \tag{38}$$

Logo, a Equação (38) é o critério de permeabilidade, que tem em conta os dois requisitos. Na ferramenta numérica são calculados os dois requisitos e considera-se apenas o valor máximo. No Quadro 14 apresentam-se os valores de i_S possíveis de introduzir na ferramenta numérica e recomendados por Giroud (2010)..

Quadro 14. Valores de gradiente hidráulico (i_S).

Tipo de Obra	i_S
Vala de drenagem	≤ 1
Drenos em muros verticais	1,5
Valas de estradas	≤ 1
Protecção de canais de água	≤ 1
Camada de drenagem de aterros	1,5
Dreno de pé em barragem	2
Dreno a montante do núcleo argiloso em barragem	3 à > 10

Protecção de canais	1
Protecção costeira	10
Reservatórios de líquidos com camada de argila	> 10
Definido pelo utilizador	—

Quanto ao critério de retenção, tal como foi feito para filtros granulares, tem-se em conta a densidade do solo e o coeficiente de uniformidade, relativo à truncagem da curva de distribuição granulométrica. Assim, o Quadro 5 também se aplica para filtros geotêxteis, onde a dimensão característica de abertura O_f é igual à O_{95}.

O critério de porosidade consiste em assegurar que o número de aberturas no filtro é suficiente para este cumprir a sua função, pois, por vezes um geotêxtil pode cumprir o critério de permeabilidade, mas possui um baixo número de aberturas por unidade de área. Então, são aplicadas as Equações (14) e (15) para determinar o número de aberturas, dependendo do tipo de geotêxtil. A Equação (39) define o número mínimo de aberturas por unidade de área que um geotêxtil deve possuir.

$$N_{omin} \approx \frac{0,1}{O_f^2} \tag{39}$$

Através destas equações relacionadas com número de aberturas, obtiveram-se dois critérios:

1. $A_R \geq 10\%$ para tecidos;
2. Porosidade do filtro (n) ≥ 55% para não tecidos.

Onde A_R é a relativa área aberta (área aberta/área total).

Na secção 3.2.2 é explicado o significado do critério de espessura e qual a sua importância. Revela-se que este está directamente ligado ao número de constrições de um filtro e que é relevante apenas para geotêxteis não tecidos. Define-se assim o limite de espessura como o número de constrições através da Equação (16).

A implementação deste método consiste em duas fases: 1) o dimensionamento do geotêxtil; 2) uma vez dimensionado, o utilizador escolhe um geotêxtil comercial e faz a verificação.

A Figura 38 e a Figura 39 demonstram as metodologias de implementação do dimensionamento e verificação, respectivamente, na ferramenta numérica.

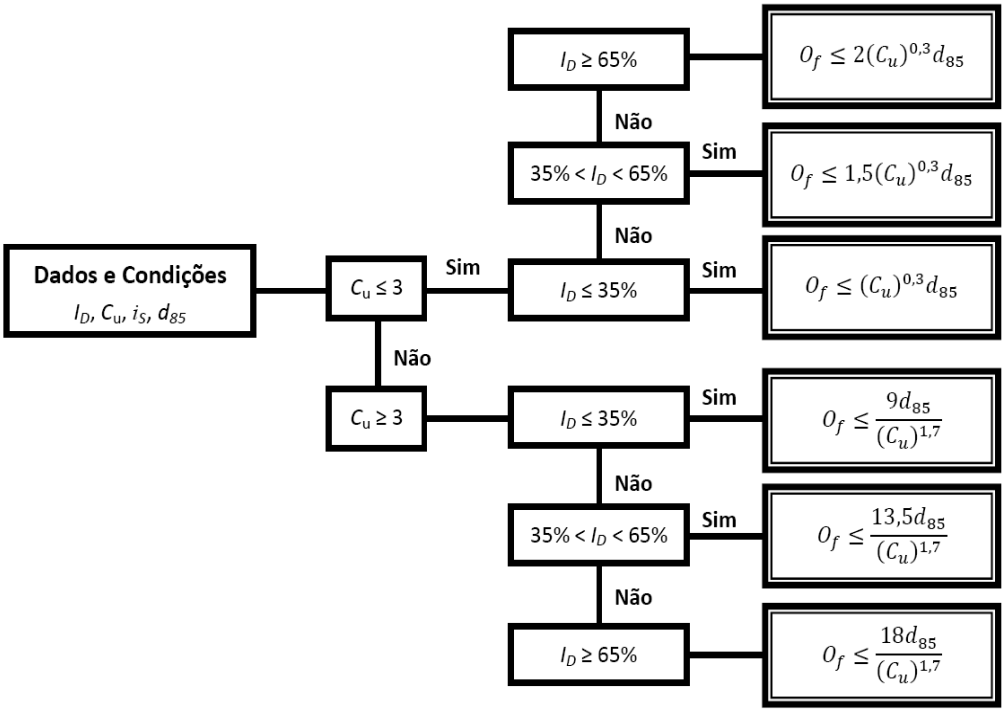


Figura 38. Processo de dimensionamento do método Giroud.

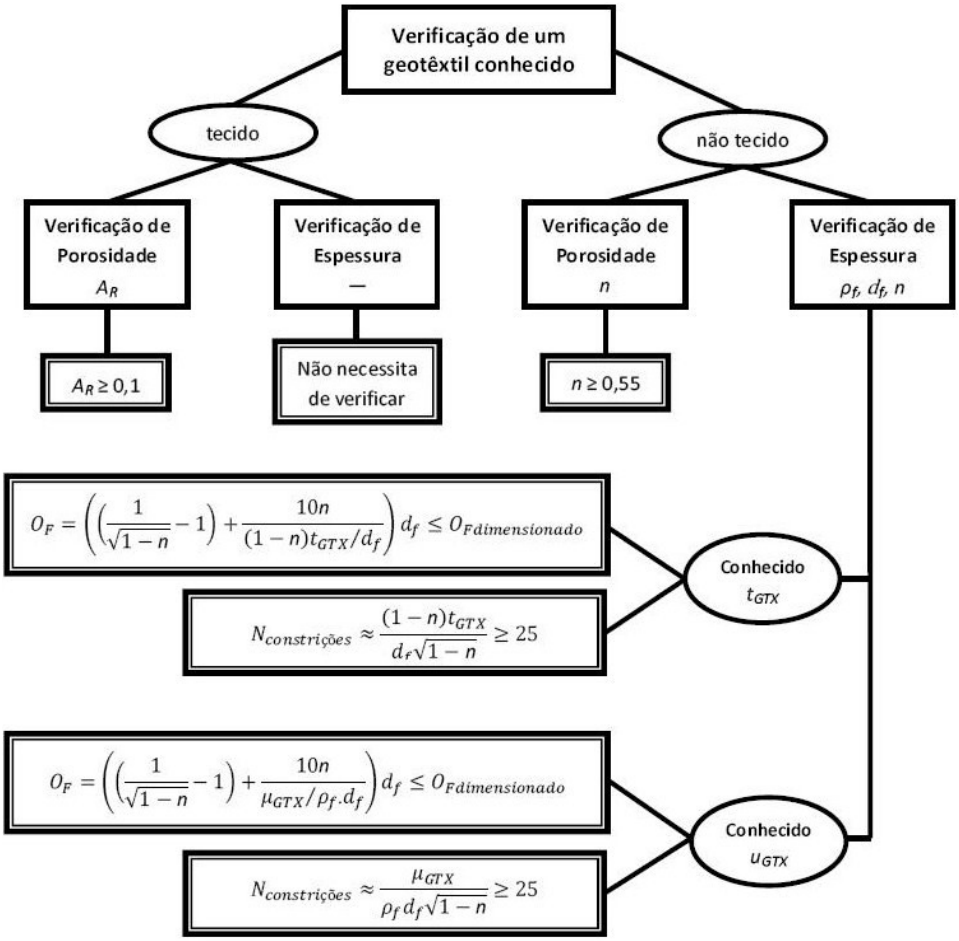


Figura 39. Processo de verificação do método Giroud (2010).

4.5. Considerações finais

Na secção 2.1 foi mencionado que muitos métodos de dimensionamento se baseavam nos princípios de Terzaghi. Através dos métodos implementados na ferramenta numérica, confirma-se esta afirmação. Encontram-se muitas semelhanças entre os métodos, entre os métodos de filtros granulares, entre os métodos de filtros geotêxteis, e também entre os métodos para filtros granulares com os de filtros geotêxteis.

A evolução dos métodos para filtros granulares mostra-se mais distribuída ao longo do tempo do que a evolução dos métodos para filtros geotêxteis, pois houve muito mais desenvolvimento de métodos para filtro geotêxteis em três décadas do que em cerca de cem anos de desenvolvimento de filtros granulares. A principal razão deste facto é que existem muitas mais normas e ensaios para filtros geotêxteis, enquanto os estudos de filtros granulares baseiam-se mais em experiências práticas ao longo do tempo.

Os critérios de retenção e de permeabilidade mantêm-se como critérios fundamentais para o dimensionamento de um filtro, seja granular ou seja geotêxtil. No entanto, novos parâmetros e condicionantes foram progressivamente introduzidos nos métodos de dimensionamento, tais como a importância da espessura e da porosidade do filtro.

Em relação aos métodos para filtros granulares, a sua implementação na ferramenta numérica é relativamente simples uma vez que apenas se aplicam fórmulas simples que dependem das dimensões das partículas do solo base, pois o C_u pode ser calculado através da Equação (4), que depende destas dimensões. São exigidos os dois critérios fundamentais, uma vez que segundo Giroud (2010), o critério de espessura e de porosidade não é necessário porque, em geral, um filtro granular tem uma espessura elevada e uma porosidade suficiente para garantir um número de aberturas suficiente. Assim, os métodos de dimensionamento para filtros granulares utilizados na ferramenta numérica empregam os critérios de retenção e permeabilidade.

A maioria dos métodos de dimensionamento para filtros granulares podem ser aplicados dependendo do coeficiente de uniformidade do solo base. Alguns têm em conta o gradiente hidráulico. O Quadro 15 apresenta os métodos para filtros granulares considerados na ferramenta numérica e quando podem ser aplicados, dependendo das condições da envolvente.

Quadro 15. Aplicabilidade e limitações dos métodos de dimensionamento para filtros granulares considerandos na ferramenta numérica.

Métodos	Aplicabilidade e limitações
Terzaghi (1922)	• Solos não coesivos • Dimensões uniformes das partículas do filtro
Bertram (1940)	• Solos uniformes e não coesivos • $8 \leq i_S \leq 20$
USCE (1953)	• Também considera solos com granulometria descontínua • $1{,}2 \leq C_u$ (solo base) $\leq 6{,}1$ • $2 \leq C_u$ (filtro) ≤ 23 • $1 \leq i_S \leq 26$
USBR (1955)	• Granulometria do solo base e do filtro devem ser semelhantes • C_u (solo base) depende do tipo de filtro a usar
Sherard *et al.* (1984)	• Considera solos uniformes e/ou bem graduados • $1{,}1 \leq C_u$ (filtro) $\leq 4{,}4$
GEOHK (1993)	• Considera solos com granulometria contínua • $4 \leq C_u$ (solo base) ≤ 20 • Não deve passar mais que 5% no peneiro 0,063mm e essa fracção deve ser não coesiva. • A dimensão máxima das partículas não deve ser maior que 50mm.
Giroud (2010)	• Solos não coesivos • Qualquer C_u (solo base) • Depende de I_D

Os métodos de dimensionamentos para filtros geotêxteis são mais extensos, pois consideram mais critérios e parâmetros, pois estes são filtros mais sensíveis às condições fronteira. No que diz respeito aos critérios, o método de Giroud (2010) é mais completo, no entanto, é apenas aplicável para solos não coesivos, ao contrário do FCGG (1989) que é aplicável para quase qualquer tipo de solo. No entanto a filtragem de solos dispersivos ou solos em suspensão não estão incluídos no campo de aplicação do critério de retenção. O método de Mlynarek (1998) deve ser valorizado pela importância dado as condições hidráulicas. O mesmo ocorre no método GSSMFE (1986), pois este método foi baseado em

engenharia costeira e experiências de protecção costeira, e por esta razão, o seu critério de permeabilidade é muito rigoroso, logo é ideal para condições severas. O método FHWA (1998) tem grande utilidade porque considera todas as situações gerais. Assim, o Quadro 16 resume os métodos e as suas limitações e condições de aplicação.

Quadro 16. Aplicabilidade e limitações dos métodos de dimensionamento para filtros geotêxteis considerados na ferramenta numérica.

Métodos	Aplicabilidade e Limitações
GSSMFE (1986)	• Ideal para condições hidráulicas severas. • Não aplicar em condições normais, pois sobredimensiona o filtro.
FCGG (1989)	• Todo tipo de situações gerais. • Não aplicar em condições onde pode existir filtragem de solos dispersivos ou solos em suspensão.
FHWA (1998)	• Todo tipo de situações gerais. • Tem ensaios para situações mais graves.
Mlynarek (1998)	• Ideal para situações onde o fluxo hidráulico governa. • Todo tipo de situações gerais.
Giroud (2010)	• Limitado a solos coesivos. • Permite fazer a verificação de um geotêxtil comercial.

Salienta-se que se deve ter em conta que em situações excepcionais devem ser realizados estudos específicos para o dimensionamento, tendo em conta as condições em causa.

5. FERRAMENTA NUMÉRICA DE DIMENSIONAMENTO DE FILTROS

5.1. Objectivos

As obras actuais são cada vez mais exigentes em termos económicos, sendo que uma forma de atingir este objectivo é concluir a obra o mais rapidamente possível, sem prejudicar a integridade do projecto. Por vezes, durante a obra é necessário efectuar alterações aos projectos e planear ou modificar estratégias de execução de obra, o que leva aos atrasos imprevistos que resultam no prolongamento do tempo de obra ou até mesmo na paragem da obra. Estes imprevistos provocam um aumento de custos indesejados e, e alguns casos, insustentáveis, especialmente caso se trate de obras de grandes dimensões, levando a uma paralisação completa por um tempo indeterminado. Portanto, procuram-se encontrar formas de evitar estes incómodos.

Uma medida a tomar é a criação de meios para dar apoio ao projecto, desde a fase inicial até à conclusão da obra. Este é o principal objectivo da criação desta ferramenta numérica de dimensionamento de filtros. A curto prazo, serve para facilitar o dimensionamento de filtros, reduzindo o seu tempo de projecto e quando necessário, durante a sua execução, obter novas soluções sem provocar atrasos ou paragens de obra, que aumentam os custos. A longo prazo, a ferramenta numérica permite obter resultados mais eficazes e com maior confiança, garantindo um bom desempenho e resultando em custos de manutenção reduzidos. Logo, no global reduz o tempo de elaboração e execução de projecto, e por sua vez, o custo total de obra.

5.2. Funcionamento

Para atingir o objectivo principal da ferramenta numérica, esta foi criada de forma que o dimensionamento de filtro seja simples e rápido, sem prejudicar a eficácia e desempenho do mesmo. Utilizou-se o programa informático Microsoft Excel com apoio de Visual Basic em Excel para criar esta ferramenta numérica. Assim, para o utilizador desta ferramenta, o dimensionamento consiste por duas fases: introdução de dados e obtenção de resultados finais.

Na ferramenta numérica, à medida que os dados são introduzidos pelo utilizador, estes são recolhidos para uma folha de armazenamento de dados, onde é feita uma filtragem dos mesmos, aplicando uma série de parâmetros. De seguida, são realizados os cálculos necessários e são obtidos todos os resultados possíveis. Estes resultados são filtrados, dependendo dos parâmetros introduzidos pelo utilizador e pela ferramenta, com fim de apresentar os resultados finais relevantes.

A Figura 40 demonstra o processo de funcionamento da ferramenta numérica, desde a sua aplicação pelo utilizador até à apresentação de resultados ao mesmo.

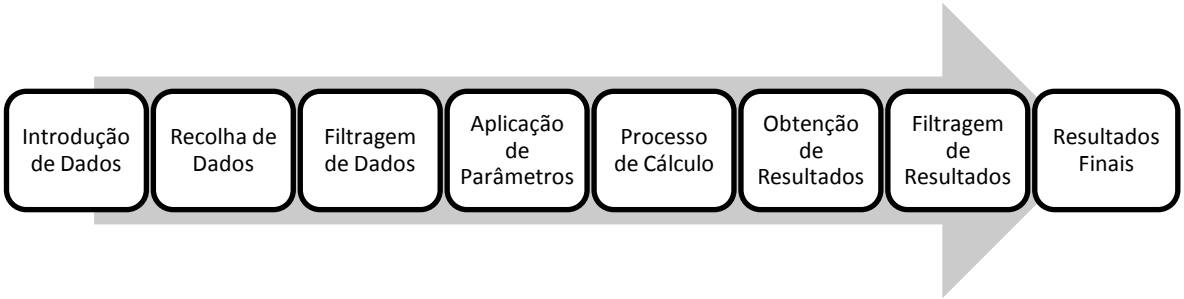


Figura 40. Processo de funcionamento da ferramenta numérica.

Assim, a ferramenta numérica consiste em várias folhas Excel, de modo a implementar de forma complementar este processo de funcionamento. O Quadro 17 faz uma listagem das folhas Excel e qual as funções das mesmas.

Quadro 17. Listagem de folhas Excel da ferramenta numérica e as respectivas funções.

Folha Excel	Função
Preenchimento	Solicitar ao utilizador informação relevante para o dimensionamento.
Métodos de Dimensionamento	Listar os métodos de dimensionamento que podem ser utilizados.
Dados granulometria	Solicitar dados relativos à distribuição granulométrica do solo a proteger.
Obtenção de dm	Apresentar a curva granulométrica para obtenção de dimensões das partículas relevantes (d_m).
Curva granulométrica	Apresentar a curva granulométrica do solo introduzido.
k	Propor valores para o coeficiente de permeabilidade do solo.
Areia Fina	Apresentar um exemplo de uma areia fina típica, ou solicitar dados de uma areia específica (relevante para o método de Mlynarek (1998)).
Giroud	Requerer a linearização da curva granulométrica, aplicável ao método Giroud (2010).
ERROS	Listar os erros existentes relativamente aos dados introduzidos.
DADOS	Recolher e filtrar os dados introduzidos pelo utilizador.
DADOSGRF	Recolher e filtrar os dados introduzidos relativamente às curvas de distribuição granulométrica e aos aos gráficos correspondentes.
PC Granular	Dimensionar filtros granulares.
PC Geotêxtil	Dimensionar filtros em geotêxtil.
Dados Finais	Apresentar os resultados relativos aos dados da obra para o caderno de obra.
Resultados Granulares	Apresentar os resultados do dimensionamento de um filtro granular, em ficha para o caderno de obra.
Resultados Geotêxteis	Apresentar os resultados do dimensionamento de um filtro em geotêxtil, em ficha para o caderno de obra.
Cuidados	Apresentar algumas recomendações relativamente a sobrevivência do filtro.

5.2.1. Introdução de dados

A introdução de dados é a fase mais importante do processo de funcionamento da ferramenta numérica, ilustrado na Figura 40. Pois esta fase inicia todo o processo que leva ao dimensionamento do filtro e depende inteiramente das escolhas efectuadas pelo utilizador, havendo necessidade de coerência na introdução dos dados. No entanto, em algumas situações, na inexistência de dados relevantes, a ferramenta numérica faz uma atribuição de dados, obtendo assim uma proposta de resultado.

Na ferramenta numérica existem várias folhas de Excel que compõem esta fase de introdução de dados. O Quadro 18 faz uma listagem destas folhas e os respectivos processos constituintes.

Quadro 18. Listagem das folhas Excel da ferramenta numérica e os respectivos procedimentos relativos à fase de introdução dos dados.

Folha Excel	Procedimento
Preenchimento	Introduzir dados relativos ao dimensionamento: tipo de filtro, tipo de obra, condicionantes, etc.
Obtenção de dm	Seleccionar os peneiros usados no processo de peneiração e a introdução das percentagens do material passado acumulado.
Curva granulométrica	Introduzir as dimensões das partículas (d_m), através da curva granulométrica.
k	Introduzir o valor de coeficiente de permeabilidade do solo.
Areia Fina	Registar as características de uma areia fina, se necessário, para o método de Mlynarek (1998).
Giroud	Realizar a linearização da curva granulométrica segundo o método de Giroud (2010).

A ferramenta numérica inicia-se na folha Excel de "Preenchimento", onde apresenta uma série de janelas. O objectivo principal destas janelas é solicitar uma quantidade limitada de dados introduzidos de cada vez, facilitando a utilização da ferramenta numérica. Têm ainda o objectivo de indicar ao utilizador que dados deve introduzir e de que modo, por selecção ou por introdução de valores.

A Figura 41 inclui um exemplo de uma janela de introdução de dados. Como é aparente, cada janela apresenta uma série de informações tal como a sua ordenação, o título de conteúdo respectivo e ainda as questões ou opções de que se dispõe.

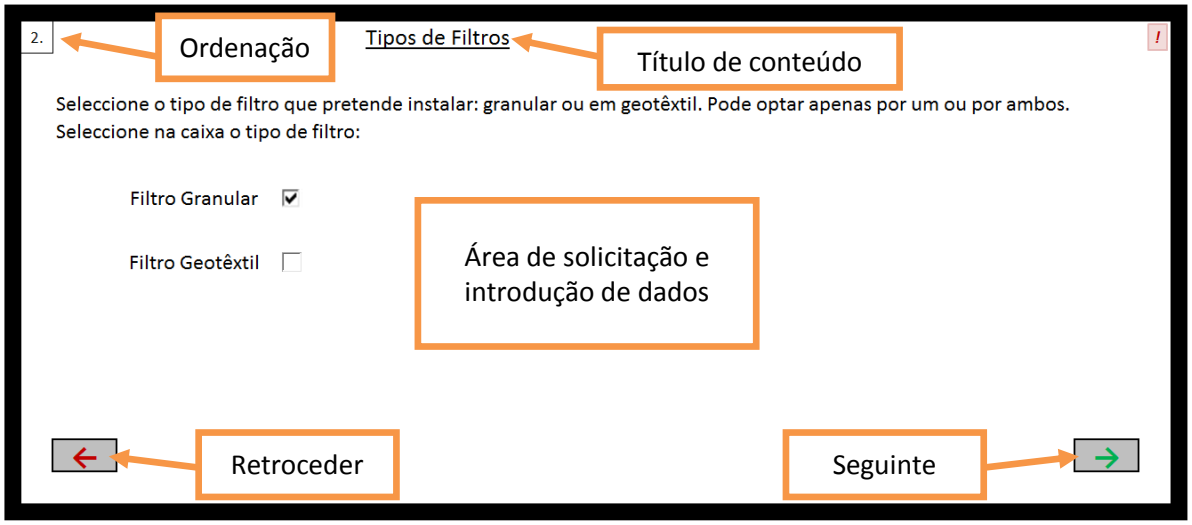


Figura 41. Exemplo de uma janela típica de introdução de dados.

Em geral, a designação é feita através de números, mas, em algumas situações, pode ter um nome, tal como é o caso de dimensionamento de uma areia fina para o método de Mlynarek (1998). A zona de introdução de dados consiste de perguntas e pedidos de informações necessários para o dimensionamento do filtro. O utilizador apenas esta limitado a seleccionar opções clicando na janela, assim facilitando a utilização da ferramenta. Estes dados podem apenas ser introduzidas em janelas desprotegidas pelo programa. Em algumas situações, será necessário introduzir valores, tal como é o caso de introdução das percentagens de material passado acumulado, entre outros casos.

O utilizador tem a liberdade de saltar entre janelas, clicando nas setas junto aos cantos inferiores da janela: pode retroceder para a janela anterior ou passar para a janela seguinte. Em algumas janelas, onde existem muitos dados introduzidos, o utilizador tem a opção de apagar os dados introduzidos na mesma janela, carregando no botão "Apagar". Na primeira janela de introdução à ferramenta numérica, existe ainda a opção de apagar todos dados introduzidos, caso se pretenda iniciar um novo dimensionamento ou preenchimento de dados.

Existem ainda opções que permitem saltar entre folhas Excel para visualizar outros dados ou informações. Estas folhas apenas servem para auxiliar o utilizador na obtenção de dados desconhecidos, tais como os métodos de dimensionamento a usar, o coeficiente de permeabilidade do solo, as características de uma areia fina típica e os erros existentes em todo o processo de preenchimento de dados. A Figura 42 demonstra um exemplo de uma janela que possui estas opções.

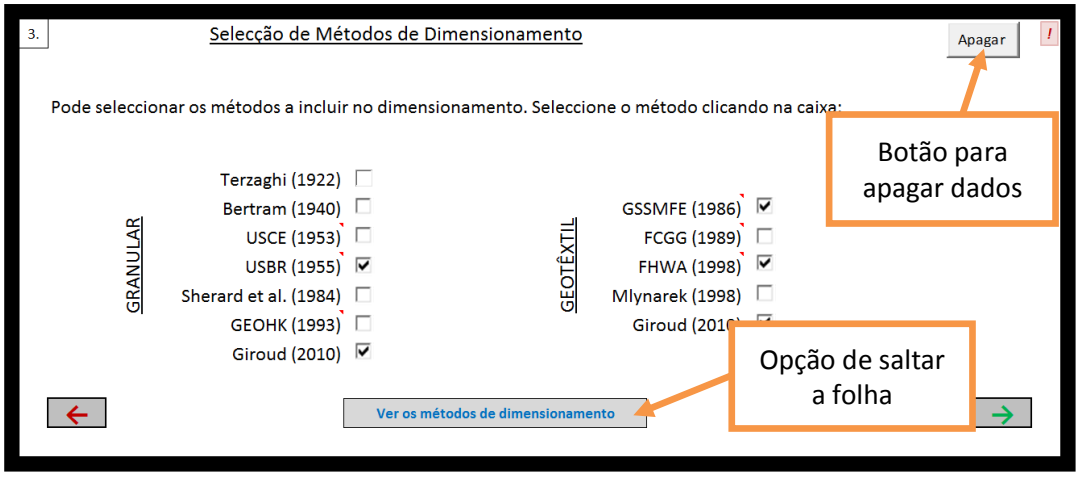


Figura 42. Exemplo de uma janela com opções adicionais, "Selecção de Métodos de Dimensionamento".

Conforme os dados que são introduzidos, a ferramenta numérica dá um aviso no caso de um erro na introdução de dados. Estes erros podem ser graves, ligeiros ou sem significado e o utilizador é avisado no instante em que ocorre este erro. O Quadro 19 lista os erros possíveis e qual o seu significado.

Quadro 19. Grau, tipo e significado de erros listados na ferramenta numérica.

Grau de Erro	Tipo de Erro	Significado
Grave	Introdução de Dados	Introdução de mais que uma opção quando só possível uma.
	Falta de Dados	Existência de falta de dados importantes para o dimensionamento.
	Valor Inválido	Valores numéricos introduzidos são inválidos, podem ultrapassar os limites impostos, ou não são valores possíveis para o dimensionamento.
Ligeiro	Valor Atribuído	Existe uma falta de dados, que não foram introduzidos, mas que não impede o dimensionamento, uma vez que a ferramenta atribui valores para as grandezas em causa.
Sem Significado	Sem Dados	Existências de folhas sem dados introduzidos mas que não interferem significativamente ao dimensionamento.

Dependendo do tipo de erro, os avisos são realçados de formas diferentes. A Figura 43 demonstra um exemplo dos avisos que podem suceder (indicados com setas).

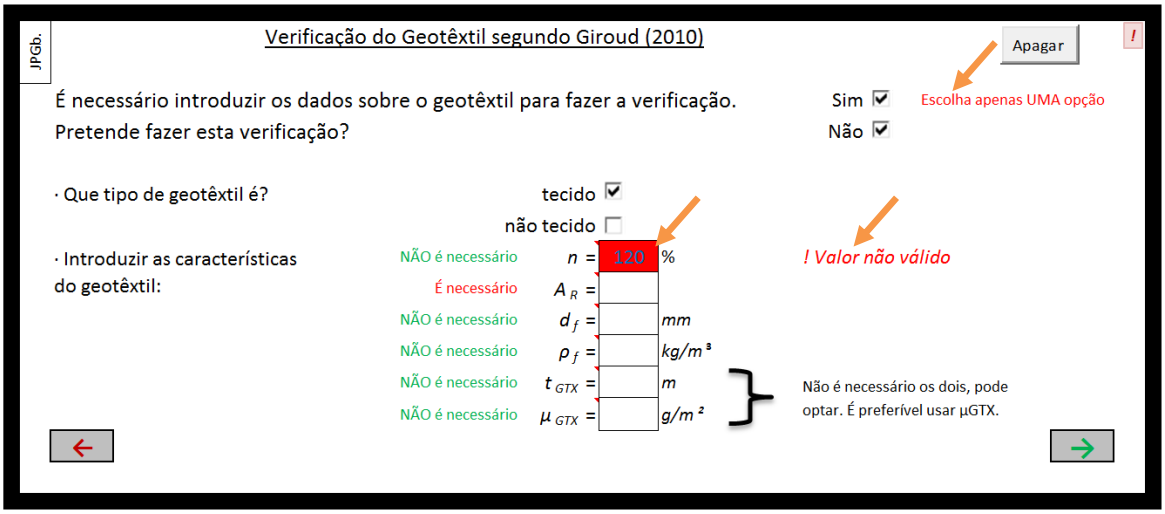


Figura 43. Exemplo de avisos de erros numa janela de preenchimento.

Como demonstra a Figura 43, no momento que é identificado um erro de selecção de dados, surge uma mensagem de aviso. Quando se trata de valores introduzidos, que por sua vez são inválidos, tal como é exemplificado, a janela de introdução do valor é colorida (neste caso a vermelho).

As mensagens de erros ainda são transmitidas para a janela seguinte, avisando assim o utilizador a retroceder para corrigir esse erro. No entanto, a manifestação desta mensagem depende da gravidade do erro. Quando se trata de um erro de um dado essencial, esta mensagem é mais realçada, caso contrário, é apenas feito um aviso. Ainda quando se trata de uma falta de dados introduzidos a que serão atribuídos valores, apesar de esta situação não ser propriamente um erro, o utilizador é avisado desta condição. A Figura 44 demonstra um exemplo destas mensagens de erros, igualmente o aviso de atribuição de dados na janela actual.

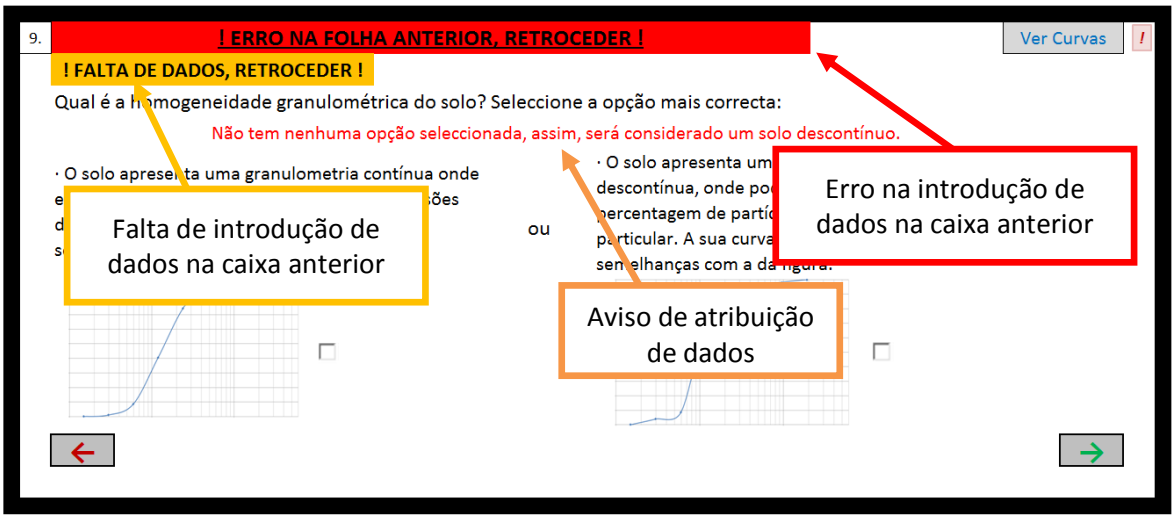


Figura 44. Exemplo de mensagens de erros graves numa janela de preenchimento.

A Figura 45 é um exemplo que demonstra uma mensagem sobre um erro ligeiro na folha anterior, ou seja, um erro que não impede o dimensionamento.

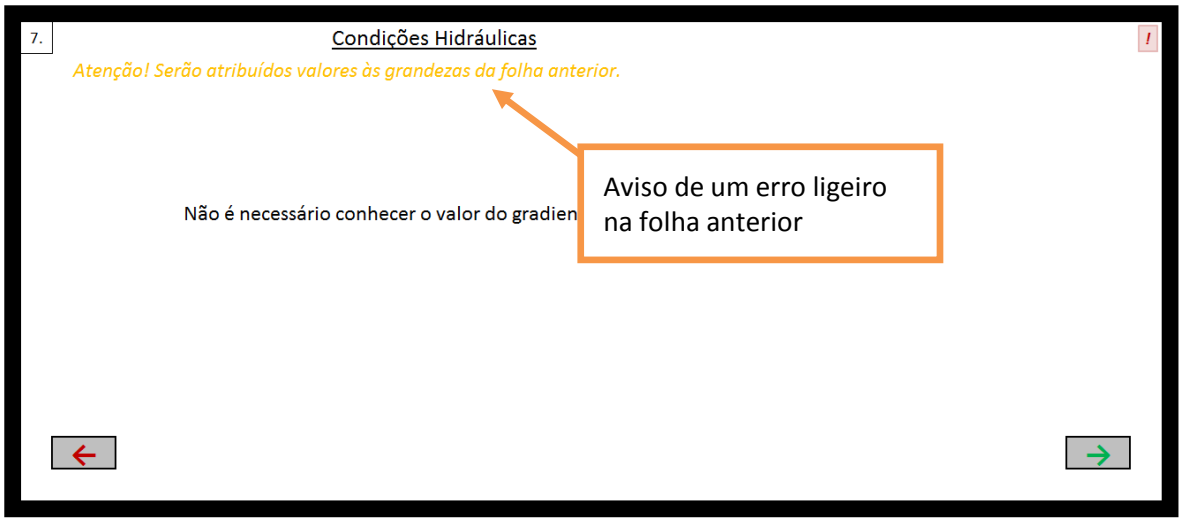


Figura 45. Exemplo de uma mensagem de um erro ligeiro numa janela de preenchimento.

Todos os erros que surgem durante o processo de preenchimento de dados são registados numa folha Excel designada por “ERROS”. Uma vez introduzidos todos os dados, chegando à janela de “Finalização: Verificação de Erros”, o utilizador é informado da existência de algum erro. Assim, caso seja encontrado algum erro significativo, o utilizador pode saltar para a folha Excel “ERROS”. A Figura 46 apresenta esta folha, onde é anotado o tipo de erro e em que janela de introdução de dados se encontra.

E R R O S

Se existe algum erro, será assinalado com um “x” no tipo de erro. Clique na folha para ir corrigir. Se não existem erros, clique em “Terminar”.

Em cada folha existe um sinal do tipo: !

Depois de corrigir o erro, clique neste botão para voltar aqui.

FOLHA (clicar para ver)	Tipo de Erro					VERIFICAÇÃO	
	Grave			Ligeiro	Sem Dados		
	Introdução de Dados	Falta de Dados	Valor Invalido	Valor Atribuido			
1.	-	-	-	-	X	OK	
2.	-	X	-	-	-	G	! RECTIFICAR !
3.	-	-	-	-	-	OK	
4.	-	-	-	-	X	OK	
5.	-	-	-	X	-	L	Pode ou não rectificar!
6.	-	-	-	X	-	L	Pode ou não rectificar!
7.	-	-	-	-	-	OK	
8.	X	-	-	-	-	G	! RECTIFICAR !
8ai.	-	X	-	-	-	G	! RECTIFICAR !
8bi.	-	X	-	-	-	G	! RECTIFICAR !
8bii.	-	X	-	-	-	G	! RECTIFICAR !
8biii.	-	X	-	-	-	G	! RECTIFICAR !
9.	-	-	-	X	-	L	Pode ou não rectificar!
10.	-	-	-	X	-	L	Pode ou não rectificar!
11.	-	-	-	-	-	OK	
12.	-	X	-	-	-	G	! RECTIFICAR !
k.	-	-	-	-	X	OK	
Areia.	-	X	-	-	-	OK	
JPGa.	-	X	-	-	-	OK	
JPGb.	-	-	-	-	-	OK	

Encontra-se erros que podem impedir o dimensionamento correcto.

Finalizar

Figura 46. Folha Excel de “ERROS”.

Através desta folha, o utilizador pode descobrir que erros existem no preenchimento e em que janela, pois, permite ainda que o utilizador possa saltar directamente para a janela em causa e corrigir o erro. No entanto, em cada janela de preenchimento de dados, existe um botão, demonstrado em Figura 47, que permite o utilizador voltar para a folha de “ERROS”, uma vez corrigido o erro. No final, quando não se verifica qualquer erro que impeça o dimensionamento, o utilizador pode voltar para a finalização do dimensionamento.

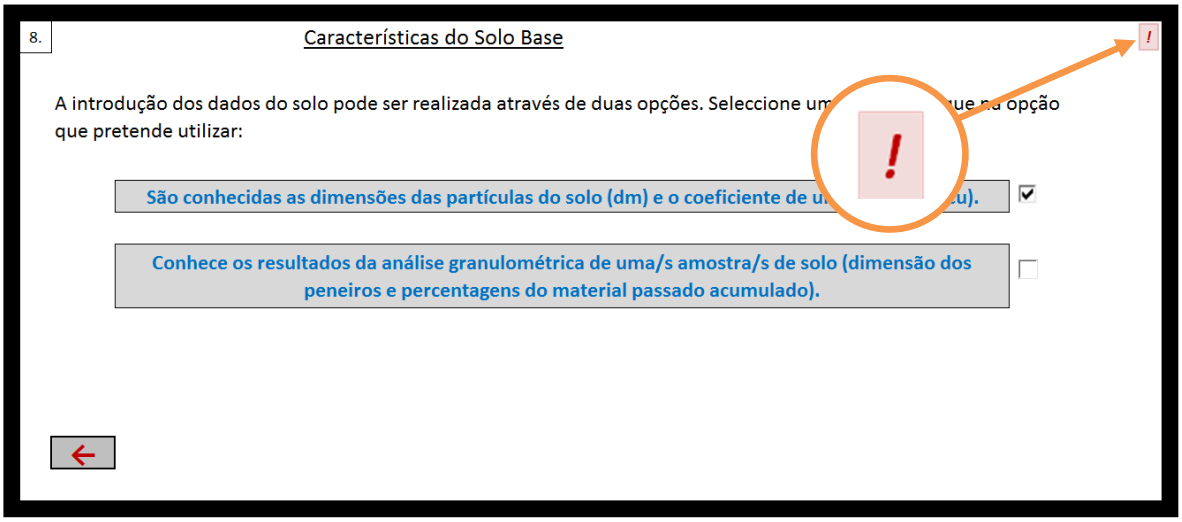


Figura 47. Botão que permite saltar para a folha de "ERROS".

Uma vez que todos os dados necessários são introduzidos, e são verificados todos os erros, é possível finalizar o dimensionamento.

A ferramenta de programação Visual Basic em Excel tem um papel muito importante em toda a ferramenta numérica, pois as janelas de selecção, o botão de "Apagar" e a visualização de dados ou folhas dependem dos comandos introduzidos nesta ferramenta de programação.

Exemplifica-se na Equação (40) a lista dos comandos para o botão de "Apagar", existente demonstrado na Figura 43, que permite apagar todos os dados introduzidos na janela de preenchimento "JPGb".

```
Private Sub CommandButton5_Click()
        Sheets("Preenchimento").Range("AP512:AP519").ClearContents
        Sheets("Preenchimento").CheckBox51.Value = False
        Sheets("Preenchimento").CheckBox52.Value = False
        Sheets("Preenchimento").CheckBox53.Value = False
        Sheets("Preenchimento").CheckBox54.Value = False
End Sub
```
(40)

5.2.2. Tratamento de dados

No que se refere à Figura 40, o tratamento de dados relaciona-se com os processos de “Recolha de Dados”, “Filtragem de Dados” e “Aplicação de Parâmetros”. O processo de cálculo da ferramenta numérica está dependente da coerência dos dados introduzidos pelo utilizador. Os dados introduzidos durante o processo de “Introdução de Dados” são transferidos para outras folhas de Excel, designadamente “DADOS” e “DADOSGRF”. Estas folhas testam a validade dos dados para poderem ser processados pelas folhas de cálculo, assim, eliminando erros que podem perturbar o processo de dimensionamento. Tem ainda dados permanentes, tais como informações usados nas curvas granulométricas. Estas folhas Excel não podem ser alteradas nem modificadas pelo utilizador, pois, qualquer alteração nestas folhas poderia ter consequências graves no funcionamento da ferramenta numérica. Assim, estas folhas são escondidas do utilizador.

A folha Excel de “DADOS” consiste em três partes, que incluem a listagem das perguntas ou pedidos de informações feitas na folha de “Prenchimento” e juntamente as respostas introduzidas pelo utilizador. Por fim, a listagem de códigos e valores, sendo estes condicionados com fim de evitar erros, pois é esta listagem de códigos que é utilizada pelos processos de cálculo. A Figura 48 demonstra esta folha de “DADOS”.

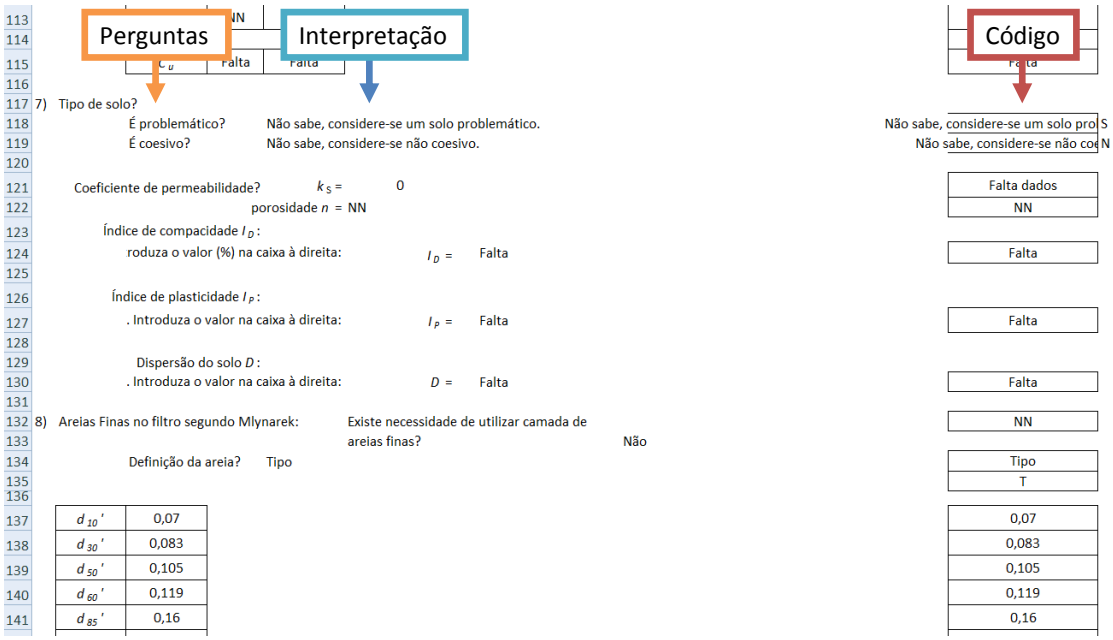


Figura 48. Folha Excel de “DADOS”.

A folha Excel de “DADOSGRF” destina-se aos dados referentes aos gráficos referentes às curvas granulométricas do solo a proteger. Esta folha destina-se a fazer uma filtragem de dados, assim evitando erros nos gráficos, conseguindo que o utilizador possa ver as curvas granulométricas à medida que introduz as características das dimensões do solo ou dos peneiros utilizados.

A filtragem de dados consiste em eliminar valores nulos ou não válidos que podem criar conflitos nos gráficos. Ainda no processo de peneiração, à medida que o utilizador vai optando pelas dimensões dos peneiros, a filtragem de dados tem o fim de apenas apresentar os valores escolhidos, quando o mesmo pretende introduzir os passados acumulados. A Figura 49 demonstra o processo de funcionamento da folha Excel “DADOSGRF”.

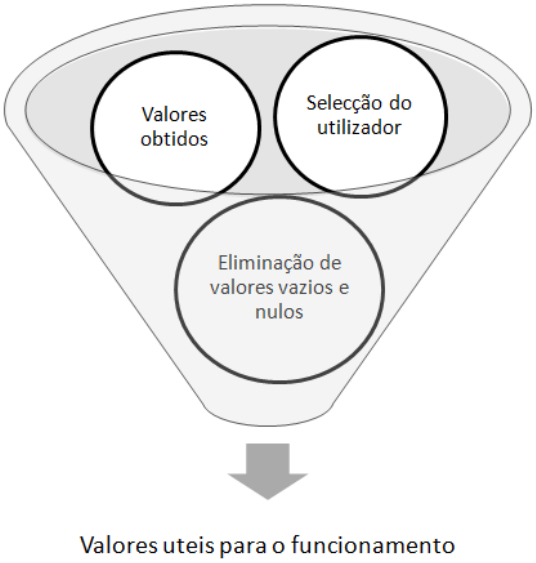


Figura 49. Filtragem de dados para o funcionamento da folha Excel “DADOSGRF”.

Como uma demonstração deste processo de tratamento de dados, exemplifica-se o caso de recolha e filtragem dos dados relativos às condições hidráulicas, ou seja, a introdução de dados realizada nas janelas 6 e 7 da folha de “Preenchimento”.

Admita-se, por exemplo, que se pretende dimensionar um filtro, seja este granular segundo o método de Bertram (1940), ou seja em geotêxtil segundo o método de Mlynarek (1998), e ainda que não é introduzida qualquer informação acerca do tipo de obra onde se pretende instalar o filtro. No entanto, o utilizador sabe que o caso em apreço se encontra em condições hidráulicas severas com um fluxo bidireccional (Figura 50), mas não é conhecido o valor do gradiente hidráulico, nem é escolhido qualquer valor (Figura 51).

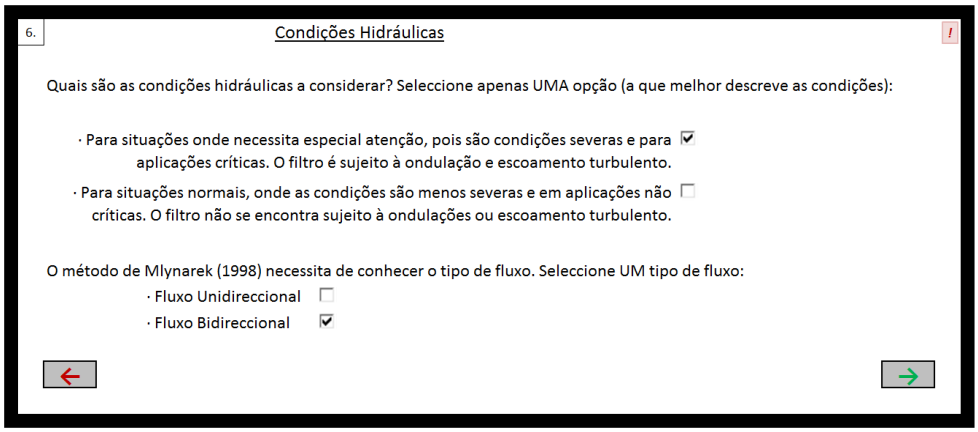


Figura 50. Exemplo de janela 6 da folha Excel "Preenchimento".

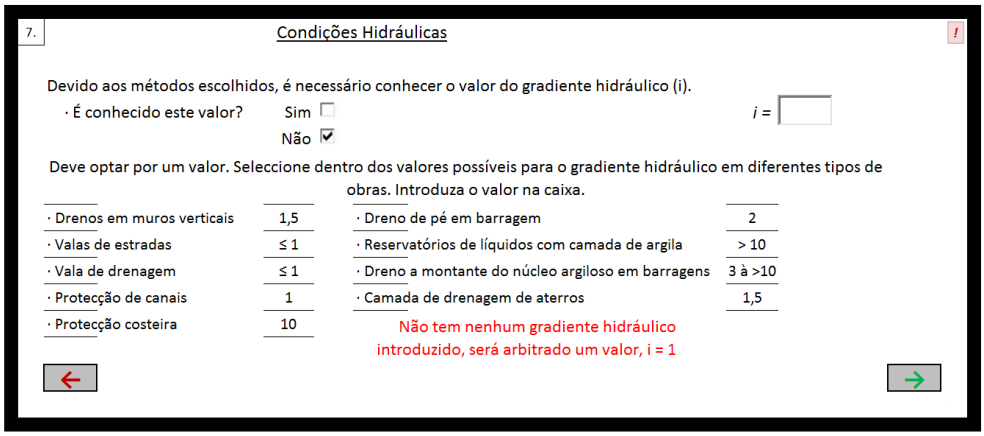


Figura 51. Exemplo de janela 7 da folha Excel "Preenchimento".

Com estes dados introduzidos, a Figura 52 demonstra os valores na folha "DADOS".

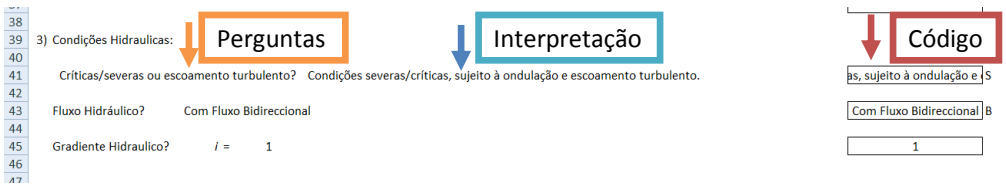


Figura 52. Exemplo da interpretação da folha "DADOS".

A interpretação consiste de inserir uma fórmula Excel de modo a obter os dados introduzidos evitando erros. Pois, estes valores são transformados num código, para serem interpretados por outras folhas Excel. O Quadro 20 apresenta as perguntas e as respectivas fórmulas de interpretação.

Quadro 20. Exemplificação de fórmulas Excel de interpretação para condições hidráulicas em "DADOS".

Perguntas das Condições Hidráulicas:	Formula Excel para Interpretação de Dados
Críticas/severas ou escoamento turbulento?	=SE(E(Preenchimento!O187="x";Preenchimento!O189="");"Condições severas/críticas, sujeito à ondulação e escoamento turbulentos. ";SE(E(Preenchimento!O187="";Preenchimento!O189="x");"Condições menos severas/críticas, não sujeito à ondulação nem escoamentos turbulentos. ";SE(E(Preenchimento!O187="";Preenchimento!O189="");"Não sabe, considere-se condições severas/críticas, sujeito à ondulação e escoamento turbulentos. ";"ERRO")))
Fluxo Hidráulico?	=SE(E(Preenchimento!I193="x";Preenchimento!I194="");"Com Fluxo Unidireccional";SE(E(Preenchimento!I193="";Preenchimento!I194="x");"Com Fluxo Bidireccional";SE(E(Preenchimento!I193="";Preenchimento!I194="");"Não sabe, considere-se fluxo bidireccional";"ERRO")))
Gradiente Hidráulico?	=SE(Preenchimento!D221="";"NN";SE(Preenchimento!Q222="";1;Preenchimento!Q222))

De seguida, é feita uma filtragem destes valores, podendo ter dois códigos, tal como demonstra o Quadro 21.

Quadro 21. Exemplificação de fórmulas Excel dos códigos para condições hidráulicas em "DADOS".

Perguntas das Condições Hidráulicas:	Formula Excel para Código de Dados	
	Código 1	Código 2
Críticas/severas ou escoamento turbulento?	=F41	=SE(K41="Condições severas/críticas, sujeito à ondulação e escoamento turbulentos ";"S";SE(K41="Condições menos severas/críticas, não sujeito à ondulação nem escoamentos turbulentos. ";"N";"S"))
Fluxo Hidráulico?	=SE(K7="x";D43;SE(K7="";"NN";"ERRO"))	=SE(K43="Com Fluxo Unidireccional";"U";SE(K43="Com Fluxo Bidireccional";"B";"B"))
Gradiente Hidráulico?	=SE(OU(K5="x";K8="x";K12="x";K13="x");E45;"NN")	-

5.2.3. Procedimento de cálculos

O procedimento de cálculo da ferramenta numérica consiste principalmente na implementação dos métodos de dimensionamento descritos no Capítulo 4. No que diz respeito à Figura 40, este procedimento engloba o processo de aplicação de parâmetros, que, por sua vez, resulta num processo de cálculo com fim de uma obtenção de dados. Os cálculos são realizados para todos os métodos, independentemente das opções do

utilizador, pois esta fase ocorre nas folhas Excel “PC Granular” e “PC Geotêxtil”, que estão protegidas, não podendo ser modificadas mas apenas visualizadas pelo utilizador.

A implementação dos métodos consiste em introduzir parâmetros nas células através de fórmulas Excel, que dependem dos valores introduzidos nas folhas de dados. Estes parâmetros são os condicionantes de cada método.

A folha Excel “PC Granular” refere-se aos métodos de dimensionamento de filtros granulares. A Figura 53 demonstra a estruturação típica desta folha da ferramenta numérica.

MÉTODO		Coeficiente de uniformidade, C_u		Critério de Filtro	Legenda	Notas
		Solo Base	Filtro			
Terzaghi (1922)	PROCEDIMENTO	Sem critério	Sem critério	• Critério de Retenção $D_{15} \leq 4$ ou $5d_{85}$ (*) • Critério de Permeabilidade $D_{15} \geq 4$ ou $5d_{15}$ (*)	D_m Dimensão do peneiro (em *mm*) que permite m% de passagem do agregado. d_m Dimensão do peneiro (em *mm*) que permite m% de passagem do solo base.	• Este critério é baseado em experiência. (*) A diferença entre factor 4 e 5 n[illegible] significativo, mas uma vez que será o valor minimo, logo é utilizado factor 4.
	CALCULOS			• Critério de Retenção $D_{15} \leq$ 0,12 • Critério de Permeabilidade $D_{15} \geq$ 0,012 0,012 $\leq D_{15} \leq$ 0,12	não coesivos? OK	
Bertram (1940)	PROCEDIMENTO	≤ 1,2 *	≤ 1,2 *	• Gradiente hidraulico de 8 a 20 • Critério de Retenção $D_{15} / d_{85} \leq 6,5$ $D_{15} / d_{15} \leq 9$	D_m Dimensão do peneiro (em *mm*) que permite m% de passagem do agregado. d_m Dimensão do peneiro (em *mm*) que permite m% de passagem do solo base.	(*) Solos uniformes e não coesivos
	CALCULO	Cu do solo base não cumpre os requisitos	$C_u \leq 1,2$	• Método não adequado para o gradiente hidraulico definido. • Critério de Retenção $D_{15} \leq$ 0,195 $D_{15} \leq$ 0,027	Cu do solo base não cumpre os requisitos. Método não adequado para o gradiente hidráulico definido.	

Figura 53. Apresentação da folha Excel “PC Granular”.

Como é ilustrado na Figura 53, os métodos de dimensionamento para filtros granulares são listados por ordem cronológica. Cada método é dividido em duas partes: os procedimentos de cálculo, e o dimensionamento associado. Nos resultados finais, ou seja, no dimensionamento associado, os vários métodos se encontram divididos por critérios de filtro e as condicionantes relativas ao coeficiente de uniformidade, com excepção dos métodos de GEOHK (1993) e Giroud (2010). Existe ainda uma área para a legenda e ainda algumas notas sobre cada método.

A folha Excel “PC Geotêxtil” tem uma estruturação semelhante, os métodos são igualmente listados por ordem cronológica e divididos em duas partes: em primeiro, têm-se

todos os critérios e parâmetros de cada método; em segundo, os cálculos realizados. A Figura 54 demonstra a estruturação genérica desta folha Excel.

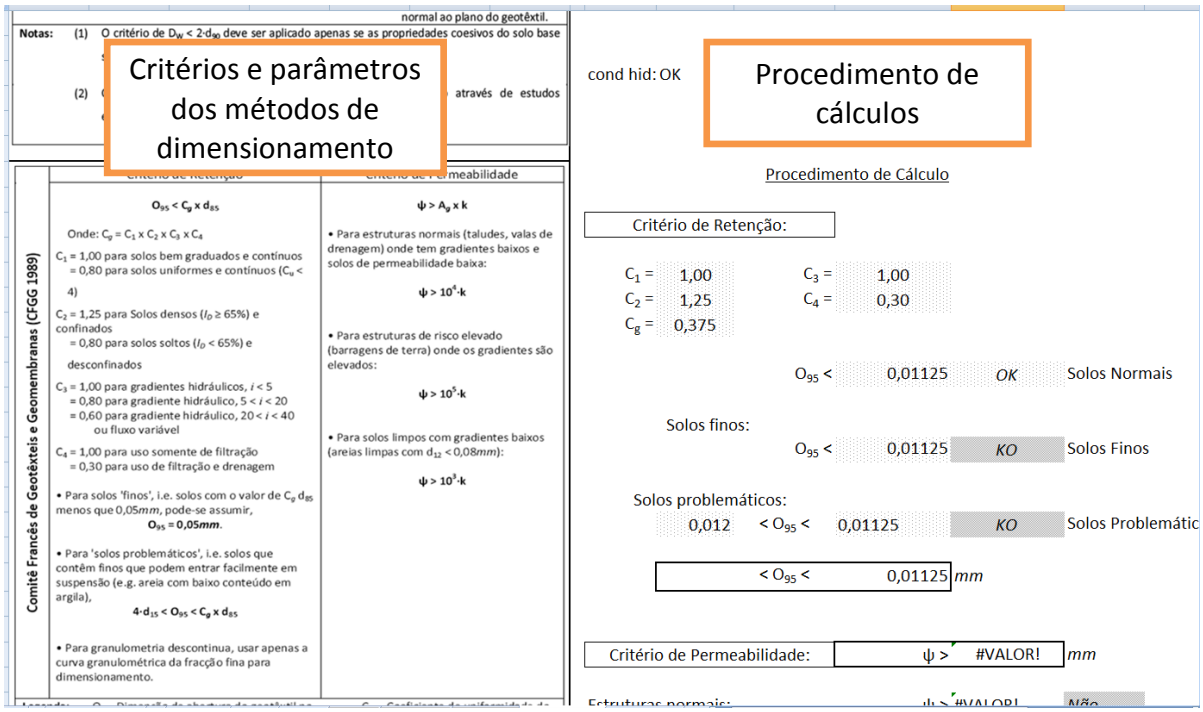


Figura 54. Apresentação da folha Excel "PC Geotêxtil".

Considerando o exemplo do capítulo anterior, secção 5.2.2, onde se utiliza o método de Mlynarek (1998) com o fluxo hidráulico bidireccional, exemplifica-se a implementação de fórmulas de modo a verificar a necessidade de uma camada de areia fina. Estes condicionantes estão ilustrados em anexo, Quadro A - 10.

A Equação (41) é a fórmula da célula que indica se é necessária ou não uma camada de areia fina. No caso de serem cumpridos todos os condicionantes necessários, resulta no valor de "Sim", caso contrário, resulta num "Não".

=SE(OU(E(DADOS!K110<0,075;DADOS!K108>=0,002;DADOS!K127<=5;DADOS!K110<0,06);E(DADOS!K110<0,075;DADOS!K108>=0,002;DADOS!K127>5;DADOS!K130>50);E(DADOS!K110<0,075;DADOS!K108>=0,002;DADOS!K127>5;DADOS!K130<=50;DADOS!K113<0,06);E(DADOS!K110<0,075;DADOS!K108<0,002;DADOS!K130<=50;DADOS!K113<0,06);E(DADOS!K110<0,075;DADOS!K108<0,002;DADOS!K130>50));"Sim";"Não") (41)

5.2.4. Tratamento dos resultados finais

O tratamento dos resultados finais compõe-se dos dois últimos processos relativos à Figura 40: filtragem de resultados; resultados finais.

Uma vez efectuados todos os cálculos para cada método de dimensionamento, efectua-se uma filtragem dos resultados. Este processo considera as opções do utilizador, tais como, qual o tipo de filtro e quais os métodos de dimensionamento que este pretendeu utilizar.

Os resultados finais (obtidos após essa filtragem) são apresentados em várias folhas Excel e de forma mais perceptível para o utilizador. Na folha "Dados Finais" são listados os dados e os condicionantes relativos à obra; os resultados de dimensionamento dos filtros são apresentados nas folhas "Resultados Granular" e "Resultados Geotêxtil". É ainda apresentada uma folha designada "Cuidados" que se refere a recomendações de cuidados construtivos a ter com o filtro. Estas folhas podem servir como base para o projecto de filtro para implementar no caderno de obra.

Então, a folha de "Dados Finais" lista todos os dados relevantes a obra, ou seja, todos os condicionantes da obra que influenciaram o dimensionamento. Ainda apresenta informações relevantes para o caderno de obra. De seguida apresenta-se a lista de dados que consistem esta folha:

1. Nome do projectista.
2. Data que foi efectuado o dimensionamento.
3. Local de obra.
4. Tipo de obra, tal como o nível de risco e função.
5. Condições hidráulicas.
6. Dados relativos ao solo base.
7. Métodos de dimensionamento utilizados.
8. Linearização segundo Giroud (2010).
9. Características da areia fina.

As folhas "PC Granular" e "PC Geotêxtil" apresentam uma estruturação semelhante. São listados os métodos utilizados, e os respectivos resultados obtidos, e comentários sobre o dimensionamento. Para cada método de dimensionamento é ainda testada a sua validade

(ou seja, se são cumpridas as condições de aplicabilidade dos mesmos). Dependendo da confiança do resultado, pode ser desaconselhada a sua utilização. Por exemplo, o utilizador pode querer considerar o método de Giroud (2010), mas o solo introduzido é um solo coesivo. Nesse caso, apresenta-se na mesma um resultado para este método, mas não a sua utilização não é aconselhada, uma vez que apenas é aplicável para solos não coesivos.

Ainda nestas folhas, quando um método não é seleccionado pelo utilizador, as linhas de Excel pertencentes a esses métodos são escondidas, assim, é apenas visível a informação referente aos métodos escolhidos. Pode ainda ser escondida a folha inteira, no caso em que não é seleccionado um filtro granular ou em geotêxtil. Apresenta-se na Equação (42) um exemplo da programação em Visual Basic que torna isto possível:

```
Private Sub CheckBox1_Click()
    If Sheets("Preenchimento").Range("I80").Value = "x" Then
    Sheets("Resultados Granulares").Rows("6:8").EntireRow.Hidden = False
    If Sheets("Preenchimento").Range("I80").Value = "" Then
    Sheets("Resultados Granulares").Rows("6:8").EntireRow.Hidden = True        (42)
    Sheets("Resultados Geotêxteis").Visible = CheckBox2.Value
    Sheets("PC Geotêxtil").Visible = CheckBox2.Value
End Sub
```

Ainda na folha Excel “Resultados Geotêxtil”, são apresentadas recomendações para a sobrevivência do geotêxtil. Em anexo, estão a Figura A - 7 e a Figura A - 8, onde se representam as exigências de resistência e os factores de redução, respectivamente, propostos por A.S.T.M. (1997) e Koerner (1999).

Estas folhas ainda possuem botões que permitem saltar entre as folhas de resultados finais. Existe ainda a possibilidade de saltar para a janela inicial da folha “Preenchimento”, caso se pretenda fazer um novo dimensionamento.

5.3. Análise de dados e resultados

5.3.1. Observações

Apesar de a ferramenta numérica possuir formas de corrigir erros de introdução de dados, é fundamental que o utilizador possa observar criticamente os dados introduzidos e os resultados obtidos, pois com uma análise crítica destes valores pode identificar algum eventual erro. Por exemplo, se é considerado um solo constituído predominantemente por areias e o resultado obtido para um geotêxtil é um que possui uma abertura característica de 3mm, é obvio que pode haver algum erro.

Assim, de forma a eliminar a possibilidade de que um erro deste género seja a consequência de má programação, procurou-se realizar testes de validação da ferramenta numérica, utilizando exemplos conhecidos, ou através de simples cálculos directos com uma máquina de calcular e aplicação de fórmulas.

A escolha de vários métodos permite que haja uma maior confiança nos resultados, e ainda melhorar a solução para um dado filtro, através de uma comparação de resultados. Assim, procurou-se fazer uma análise e uma comparação dos resultados entre os métodos implementados na ferramenta numérica.

Em resumo, procurou-se realizar uma análise e uma comparação de:

1. Resultados entre os vários métodos implementados da ferramenta numérica.
2. Para cada método utilizado, entre os resultados de um exemplo de aplicação dado pelo autor do método e os correspondentes obtidos na ferramenta numérica.
3. Os resultados obtidos via ferramenta numérica e os de uma situação real, para cada método.

Assim, o objectivo foi eliminar (ou minimizar) a possibilidade de um erro de programação, resultando num aumento de fiabilidade da ferramenta numérica.

Salienta-se que os valores apresentados são apenas recomendações de vários métodos e que a decisão final pertence do utilizador.

5.3.2. Comparação dos resultados entre métodos

5.3.2.1. Considerações iniciais

São realizadas duas análises comparativas, uma entre os métodos de dimensionamento para filtros granulares, e outra para filtros em geotêxtil. Relativamente aos resultados, é feita uma primeira análise entre os resultados obtidos pela ferramenta numérica e os resultados obtidos manualmente, verificando assim a validade dos valores obtidos. Numa segunda análise, é feita uma comparação entre os resultados finais dos vários métodos de dimensionamento, identificando assim diferenças e semelhanças entre os métodos, com o objectivo de chegar a uma recomendação fiável.

De modo a efectuar as análises comparativas, criaram-se várias situações diferentes de cálculo, de modo a verificar todos os cálculos possíveis. É exemplificado um exercício de aplicação e realizaram os cálculos manualmente, com uma máquina de calcular, para todos os métodos, aplicando as respectivas fórmulas de cálculo, obtendo resultados para a análise comparativa com a ferramenta numérica. A Figura 55 apresenta os dados do Exercício 5.3.2 e os respectivos resultados de dimensionamento estão representados na Figura 56 e na Figura 57.

Salienta-se que este exercício apenas tem o objectivo de analisar os métodos relativos aos filtros granulares e filtros em geotêxtil, o que significa que os valores introduzidos podem não ter nenhuma validade realista. Numa primeira análise é verificado detalhadamente cada resultado obtido nas folhas “PC Granular” e “PC Geotêxtil” comparando estes com resultados obtidos através de cálculos manuais. Nisto, qualquer erro de cálculo é corrigido, com fim de obter coerência nos resultados. De seguida verificam-se os resultados apresentados nas folhas “Dados Finais”, “Resultados Granular” e “Resultados Geotêxtil”, com objectivo de conferir que os resultados apresentados ao utilizador são resultantes das opções e condicionantes impostos pelos critérios de dimensionamento.

Assim, garantindo que os resultados são conforme os métodos, segue-se uma segunda análise comparando os resultados entre os métodos.

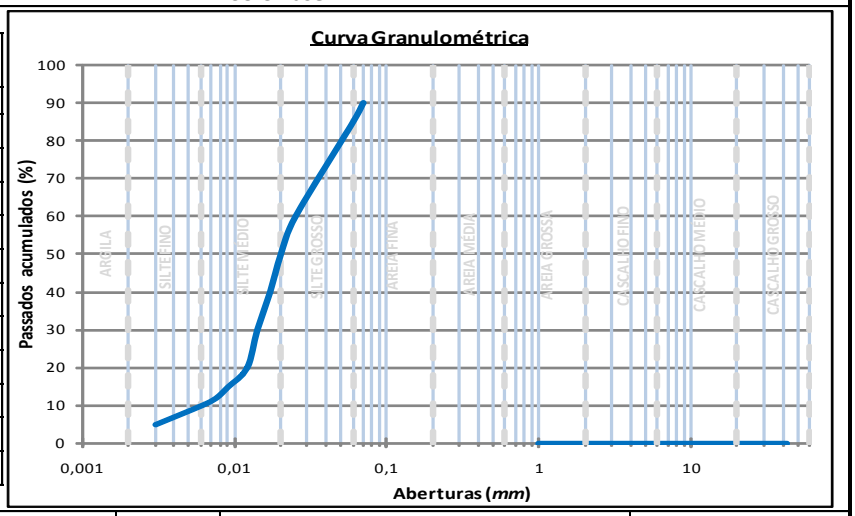
Nome:	*Exemplo 5.3.2*	**Data:**	

Local de Obra:	*Aveiro*		
Tipo de Obra:	*Exemplo*		
Nível de Risco:	*Algum*	**Função de Filtro:**	*Apenas filtragem.*

Condições Hidráulicas	*Condições menos severas/críticas, não sujeito á ondulação nem turbulências. Com Fluxo Bidireccional*	
	Gradiente Hidráulico (*i*):	*2*

Solo Base

Dimensão das partículas	
Designação	***mm***
d_5	0,003
d_{10}	0,006
d_{12}	0,0075
d_{15}	0,009
d_{20}	0,012
d_{30}	0,014
d_{40}	0,017
d_{50}	0,02
d_{60}	0,025
d_{85}	0,06
d_{90}	0,07



Coeficiente de uniformidade C_u:	5	**Coeficiente de permeabilidade k_S(m/s):**	0,00001
Porosidade do solo *n* :	NN	**Índice de compacidade I_D *(%)* :**	50
Dispersão do solo *D (%)* :	70	**Índice de plasticidade I_P :**	4
Tipo de solo:	*Granulometria Contínua. Não é um solo problemático. É coesivo.*		

Tipo de Dimensionamento:		*Normal.*
Métodos	**Filtros Granulares:** Granular	*Terzaghi (1922) | Bertram (1940) | US Waterways Experiment Station (USCE 1953) | US Bureau of Reclamation (USBR 1955) | Sherard et al. (1984) | Geotechnical Engineering Office of Hong Kong (GEOHK 1993) | Giroud (2010).*
	Filtros Geotêxteis: Geotêxtil	*German Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (GSSMFE 1986)| French Committee on Geotextiles and Geomembranes (FCGG 1989) | Federal Highway Administration (FHWA 1998) | Mlynarek (1998) |Giroud (2010).*

☐ Não Visualizar a Linearidade do Giroud (2010) ☑ Não Visualizar Definições de Areia Fina

Linearização do Giroud (2010)

Resultados obtidos através de uma truncagem da curva granulométrica para uma analise do coeficiente de uniformidade linear:

Dimensão	***mm***
d_{10}'	0,008
d_{15}'	0,009
d_{60}'	0,027
d_{85}'	0,05
C_u'	4

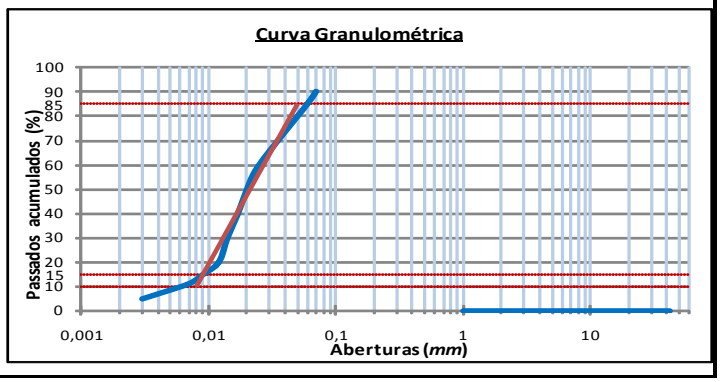


Figura 55. Folha de dados do Exercício 5.3.2.

Método	Filtro	Comentários		
Terzaghi (1922)	**$0{,}036 \leq D_{15}$ (mm) $\leq 0{,}240$**	O solo é coesivo. Este método é apenas aplicável para solos não coesivos.		KO
Bertram (1940)	**D_{15} (mm) $\leq$ 0,081**	Cu do solo base não cumpre os requisitos. Método não adequado para o gradiente hidráulico definido.		KO
US Waterways Experiment Station USCE (1953)	**$0{,}045 \leq D_{15}$ (mm) $\leq 0{,}180$**			OK
US Bureau of Reclamation USBR (1955)	**$0{,}100 \leq D_{50}$ (mm) $\leq 0{,}200$**	Filtros Uniformes	Parâmetros Adicionais D100 < 75mm	OK
	$0{,}240 \leq D_{50}$ (mm) $\leq 1{,}160$ **$0{,}108 \leq D_{15}$ (mm) $\leq 0{,}360$**	Cu náo permite filtros graduados.	Granulometria do solo base e filtros de formas similares.	KO
	$0{,}180 \leq D_{50}$ (mm) $\leq 0{,}600$ **$0{,}054 \leq D_{15}$ (mm) $\leq 0{,}162$**	Material Britado	Solo base apenas para partículas com dimensão menor que 4,76mm.	OK
Sherard et al. (1984)	**D_{15} (mm) < 0,540**	Parâmetros Adicionais A quantidade de partículas finas (< 0,075mm) no filtro não deve ser significativa. Granulometria do solo base e do filtro não necessitam de ter a mesma forma.		OK
Geotechnical Engineering Office of Hong Kong GEOHK (1993)	**$0{,}045 < D_{15}$ (mm) $< 0{,}300$** **D_5 (mm) $\leq$ 0,063** **D_{100} (mm) $\leq$ 50,00**	Parâmetros Adicionais A curva granulométrica do filtro deve ser contínua. D5 ≤ 0,063mm 4 < Cu < 20 D100 ≤ 50mm		OK
Giroud (2010)	**$0{,}036 \leq D_{15}$ (mm) $\leq 0{,}064$**	O solo é coesivo. Este método é apenas aplicável para solos não coesivos.		KO
Resultado médio	**D_5 (mm) $\leq$ 0,063** **$0{,}048 \leq D_{15}$ (mm) $\leq 0{,}296$** **$0{,}140 \leq D_{50}$ (mm) $\leq 0{,}400$** **D_{100} (mm) $\leq$ 66,67**	Estes valores são baseados na média dos resultados obtidos pelos métodos de dimensionamento aplicáveis (assinalados com OK).		

Figura 56. Folha 1 dos resultados do filtro granular para Exercício 5.3.2.

Método	Filtro	Comentários	
German Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (GSSMFE 1986)	**D_w (mm) < 0,140** **k_n (ms^{-1}) ≥ 5,00E-04**	D_w é a dimensão de abertura obtido por peneiração (molhado) usando equipamentos modificados de peneiros vibratórios e uma areia bem graduada. Este método aplica-se para condições hidráulicas muito graves. Logo, este filtro é sobredimensionado para as condições encontradas na obra onde se instala	KO
French Committee on Geotextiles and Geomembranes (FCGG 1989)	**< O_{95} (mm) < 0,050** **ψ (sec^{-1}) > 0,010**	Dimensionamento para: Solos Finos	OK
Federal Highway Administration (FHWA 1998)	**O_{95} (mm) ≤ 0,027** **k_n (ms^{-1}) ≥ 1,00E-05** **ψ (sec^{-1}) ≥ 0,500**	AOS ≥ 4% tecidos n ≥ 50% não tecidos	OK
Mlynarek (1998) Areia	**0,142 < O90 (mm) < 0,177** **k_n (ms^{-1}) ≥ 2,00E-04**	Usar uma camada de 150mm de areia fina com este geotêxtil. Realizar ensaio de filtragem para o sistema geotêxtil/solo recomendado.	OK
Giroud (2010)	**O_f (mm) ≤ 0,064** **k_f (ms^{-1}) ≥ 2,00E-05**	O solo é coesivo. Este método é apenas aplicável para solos não coesivos. Espessura do geotêxtil de 1mm a 10mm. Não se fez a verificação do geotêxtil.	KO
Resultado Médio	**0,142 ≤ O_f(mm) ≤ 0,085** **k_f (ms^{-1}) ≥ 1,05E-04** $\psi = k_f/t_g$ **ψ (sec^{-1}) ≥ 0,255**	Usar uma camada de 150mm de areia fina com este geotêxtil. Realizar ensaio de filtragem para o sistema geotêxtil/solo recomendado. Espessura do geotêxtil (t_g) de 1mm a 10mm.	

Figura 57. Folha 1 dos resultados para um filtro em geotêxtil do Exercício 5.3.2.

5.3.2.2. Para filtros granulares

Considerando o Exercício 5.3.2, os resultados obtidos para um filtro granular são representados na Figura 56. À primeira vista, sem considerar a validação dos métodos, encontram-se resultados bastante variados. No entanto, os valores mínimos de dimensão de aberturas, ou seja, os valores referentes ao critério de permeabilidade, são relativamente próximos. Nota-se assim que a maior variedade diz respeito ao critério de retenção.

Para uma análise mais justificada, considere-se apenas os resultados cujos métodos são aplicáveis. Assim, o Quadro 22 apresenta os valores obtidos, nomeadamente os máximos, mínimos e médios.

Quadro 22. Valores máximos, mínimos e médios dos resultados granulares do Exercício 5.3.2

Mínimo	Médio	Máximo	Dimensão (mm)	Mínimo	Médio	Máximo
			$D_5 \leq$	0,063	0,063	0,063
0,045	0,048	0,054	$\leq D_{15} \leq$	0,162	0,296	0,540
0,100	0,140	0,180	$\leq D_{50} \leq$	0,200	0,400	0,600
			$D_{100} \leq$	50,00	66,67	75,00

O Quadro 22 permite avaliar com melhor rigor a variedade dos resultados obtidos. Pois, são os dados necessários para aplicar a Equação (43) com fim de obter uma percentagem que permite avaliar o desvio dos valores relativamente à média calculada. Consiste em obter o intervalo máximo de afastamento, dividindo este pelo valor médio obtido, achando assim a percentagem máxima de desvio do valor médio.

$$\text{Desvio}(\%)=\frac{\max([\sum \text{médio-mínimo}];[\sum \text{máximo-médio}])}{\text{valor médio}}\times 100 \tag{43}$$

Este método de verificação permite avaliar a variedade de resultados e mais importante, validar a utilização dos valores médios para o dimensionamento. O Quadro 23 demonstra as percentagens do desvio do valor médio.

Quadro 23. Valores percentuais do desvio da média para resultados granulares.

Desvio (%)	Dimensão (mm)	Desvio (%)
	$D_5 \leq$	0
12,5	$\leq D_{15} \leq$	82,4
28,6	$\leq D_{50} \leq$	50
	$D_{100} \leq$	25

Verifica-se que o valor médio é bastante afastado dos valores obtidos pelos métodos de dimensionamento, com excepção do D_5 que apenas depende de um método. No entanto, não se pode concluir sobre a validação do uso dos valores médios apenas através de um exercício, assim cabe ao projectista avaliar e decidir se utiliza estes valores.

De uma analise global, concluiu-se que, apesar de à primeira vista os valores relativos à permeabilidade perecerem próximos, o mínimo desvio encontrado foi um valor relativamente alto de 12,5%.

Com esta análise, recomenda-se que os valores médios apenas sejam utilizadas como auxiliar de verificação dos resultados obtidos e para análise e comparações dos mesmos. Assim, o projectista pode optar por utilizar o valor máximo para o critério de permeabilidade, e o valor mínimo para o critério de retenção, não sendo obrigatório este método. No entanto, utilizando este modo de dimensionamento, o filtro granular possível teria os resultados demonstrados no Quadro 22, onde as dimensões de aberturas do filtro serão maiores que os valores máximos, e menores que os valores mínimos.

Neste caso, o método de Sherard *et al.* (1984a) é desprezado, uma vez que os seus valores de retenção são muito maiores. O mesmo acontece com o método U.S.B.R. (1955), quando se trata de um filtro com material britado. Ao contrário destes, o método de U.S.C.E. (1953) apresenta valores relativamente perto daquilo que neste trabalho se referiu como sendo um dimensionamento adequado.

Nem sempre são estes os resultados, pois apenas é apresentado o caso do Exercício 5.3.2, o que significa que as conclusões obtidas podem não ser as mesmas noutro exercício. Salienta-se que este exemplo apenas foi usado para demonstrar o tipo de análise crítica que um projectista deve ter quando analisa os resultados finais.

5.3.2.3. Para filtros em geotêxtil

Na Figura 57, apresentam-se os resultados obtidos para um filtro geotêxtil relativo ao Exercício 5.3.2. O modo de analisar os resultados do geotêxtil é igual ao modo que se usou para analisar os resultados do filtro granular. Em anexo, o Quadro A - 18 apresentam-se os valores máximos, mínimos e médios obtidos e no Quadro A - 19 os valores percentuais dos desvios dos resultados em função da aplicação da Equação (43).

Apesar de, neste exercício, o desvio do valor mínimo relativo ao critério de retenção ser zero, não se pode confirmar que seja um resultado completamente fiável uma vez que este valor depende de apenas um método, Mlynarek (1998b). No entanto, com resultados óbvios, os desvios relativamente ao valor médio são muito maiores do que aconteceu para filtros granulares. Uma razão para este acontecimento pode ser o facto de apenas três dos cinco métodos poderem ser aplicados ao caso em apreço. Isto significa que uma análise deste tipo, não é rigorosa, e por sua vez não se deve utilizar os valores médios como valores de dimensionamento mas sim, como valores para consulta e comparação de resultados.

Tal como se verificou em filtros granulares, no que diz respeito ao Quadro 23, o resultado da dimensão da abertura do geotêxtil deve ser maior que o valor máximo (aos valores à esquerda), e menor que o valor mínimo (aos valores à direita). Obtém-se assim um intervalo mais restrito para o critério de retenção.

Relativamente ao critério de permeabilidade, pode-se considerar o valor máximo. No entanto, deve-se ter em atenção a necessidade de realizar ensaios de filtragem ou a necessidade de uma camada de areia fina.

Conclui-se que, devido ao facto que nem todos os métodos poderem ser aplicados, o projectista deve analisar um a um os resultados obtidos por cada método, pois a média não apresenta valores rigorosos.

Quanto à comparação de todos os métodos de filtros em geotêxtil, independentemente da sua aplicabilidade, os resultados obtidos são muito variados, exigindo assim a implementação de mais métodos de dimensionamento, de modo a atingir uma maior gama de valores para uma comparação mais rigoroso. No entanto, não se tira a validade dos resultados obtidos por cada método, acabando ao projectista decidir que resultado pretende utilizar para o dimensionamento do filtro.

5.3.3. Validação dos métodos

5.3.3.1. Considerações iniciais

Na secção 5.3.1, confirmou-se que todas as fórmulas de aplicação na ferramenta numérica estão correctas. No entanto, na secção 5.3.2, quando se realiza uma comparação de resultados, podem surgir dúvidas sobre a validade dos resultados finais.

De modo a afastar estas dúvidas, é realizada uma comparação relativamente aos resultados obtidos pela ferramenta numérica e os resultados obtidos pelos autores dos respectivos métodos. Uma vez que os métodos de dimensionamento de filtros granulares são relativamente directos, é suficiente uma verificação dos cálculos e realizar uma comparação entre os métodos para estes filtros. No entanto, os métodos de dimensionamento para filtros geotêxteis são mais elaborados, justificando assim a necessidade desta comparação, de forma a verificar a fiabilidade da ferramenta numérica.

No entanto, dado que métodos como de GSSMFE (1986) e CFGG (1989) são métodos relativamente antigos, não se encontraram exercícios práticos destes autores. Assim, apenas são utilizados para a comparação entre os métodos da ferramenta numérica como auxilio dos resultados. É então feita uma comparação entre os resultados obtidos pela ferramenta numérica e os resultados obtidos pelos autores dos métodos FHWA (1998), Mlynarek (1998) e Giroud (2010).

5.3.3.2. Para filtros em geotêxtil

Através do exemplo de dimensionamento de um filtro em F.H.W.A. (1998), fez-se a análise de resultados. Pretende-se dimensionar um filtro para uma vala de drenagem de uma estrada, assumindo que é uma aplicação não crítica, logo um dimensionamento não conservativo. Os solos são bem graduados, com um gradiente hidráulico baixo e fluxo estável e com um coeficiente de permeabilidade $k_S = 1x10^{-4}$ (m/s). Apresenta-se no Quadro 24 informação sobre uma amostra do solo existente no local da obra.

Quadro 24. Percentagem dos Acumulados Passados, exemplo de F.H.W.A. (1998).

Dimensão do Peneiro (mm)	Percentagem de passados acumulados (%)
25	99
13	97
4,76	95
1,68	90
0,84	78
0,42	55
0,15	10
0,074	1

Introduziram-se os dados do exercício, obtendo-se a folha de dados finais de Exercício FHWA representada na Figura A - 6 em anexo. Os resultados obtidos pela ferramenta numérica estão representados na Figura 58.

Método	Filtro		Comentários		
Federal Highway Administration (FHWA 1998)	O_{95} (mm) ≤	**0,450**			OK
	k_n (ms^{-1}) ≥	**2,00E-04**	AOS ≥ 4%	tecidos	
	ψ (sec^{-1}) ≥	**0,500**	n ≥ 50%	não tecidos	

Figura 58. Resultados obtidos pela ferramenta numérica do Exercício FHWA.

Verificou-se que o dimensionamento obtido pela ferramenta numérica é igual ao do exemplo no F.H.W.A. (1998). Assim, deixa-se de pôr em causa a validação do dimensionamento feito pela ferramenta numérica, para este método.

De forma a testar a ferramenta numérica para o método de Mlynarek (1998), efectuaram-se os exemplos que se encontram no documento de Mlynarek (1998b). O Quadro A - 13, o Quadro A - 14, o Quadro A - 15 e o Quadro A - 16, em anexo apresentam os dados de cada exemplo.

Estes exemplos apenas testam a ferramenta numérica no que diz respeito à escolha de um filtro, pois valores tais como o coeficiente de permeabilidade, apesar de não ser dada nenhuma informação sobre este parâmetro, consideraram-se valores para esta dependendo do tipo de solo em obra. Apresenta-se na Figura A - 4 e na Figura A - 5, em anexo, uma exemplificação dos resultados de dados obtidos pela ferramenta numérica, nomeadamente

os dados do Exemplo 2 do Quadro A - 14. Com estes dados, chegou-se aos resultados de dimensionamento demonstrados na Figura 59.

Método	Filtro	Comentários	
Mlynarek (1998)	**0,108 < O90 (mm) < 0,135** **k_n (ms^{-1}) ≥ 2,00E-04**	Usar uma camada de 150mm de areia fina com este geotêxtil. Realizar ensaio de filtragem para o sistema geotêxtil/solo recomendado.	OK

Figura 59. Resultados de geotêxtil para Exemplo 2 de Mlynarek (1998b).

Como é demonstrado pela Figura 59, com a ferramenta numérica chega-se à mesma conclusão que o autor em causa, tal como se verificou para os outros exemplos. Verifica-se assim a sua fiabilidade para a escolha de um geotêxtil para um filtro segundo o método de Mlynarek (1998). No entanto, no que diz respeito ao critério de permeabilidade, uma vez que se trata de aplicação de fórmulas directas, este é verificado comparando os resultados da ferramenta com resultados obtidos através de simples cálculos manuais.

De modo a verificar o critério de permeabilidade, assumiu-se um valor de k_S igual a $2x10^{-4}$m/s. Assim, aplicando as fórmulas, e usando uma máquina de calcular, compararam-se os valores obtidos com os valores resultantes da ferramenta numérica. Chegou-se a valores idênticos, verificando-se assim o critério de permeabilidade e, por sua vez, a ferramenta numérica para o método de Mlynarek (1998).

Giroud (2010) apresenta um exemplo de aplicação deste método onde o dimensionamento é implementado num caso real, possuindo assim dados sobre um geotêxtil para, para além do seu dimensionamento, fazer também a sua verificação.

Pretende-se dimensionar um filtro para um sistema de drenagem de uma barragem, onde predomina um solo do tipo areia siltosa. Não são dados os valores da distribuição granulométrica do solo, no entanto, é dada a dimensão das partículas equivalente a 85% de passados acumulados, d_{85} = 1,8mm, e o coeficiente de uniformidade C_u = 25.

O Quadro 25 expõe os dados do exemplo, que são introduzidos na ferramenta numérica com fim de chegar a valores de dimensionamento e verificações para uma análise comparativa.

Quadro 25. Dados do exemplo em Giroud (2010).

Parâmetro	Valor	Unidade (SI)
d_{85}	1,8	mm
C_u	25	-
k_S	$1x10^{-7}$	m/s
Geotêxtil	Não Tecido	-
n	92	%
d_f	0,027	mm
ρ_f	1380	kg/m^3
μ_{GTX}	0,3	kg/m^2

No exemplo demonstrado por Giroud (2010) chega-se à conclusão que, com estes dados, o geotêxtil deve apresentar as seguintes características: $O_f \leq 0{,}135$mm; $k_{GTX} \geq 1x10^{-6}$m/s. Deve ainda verificar-se a porosidade. De facto, como n = 92% é maior que o 55% exigido, cumpre-se o critério de porosidade. Ainda, estes resultados cumprem o critério de espessura, uma vez que o geotêxtil apresenta 28 constrições e a O_f calculado com as características do geotêxtil é menor que o valor de dimensionamento, $O_{f\text{verificação}}$ = 0,099mm que é menor que 0,135mm.

Relativamente aos resultados obtidos pela ferramenta numérica, estes coincidem com o exemplo, excepto a O_f = 0,136mm. Considerou-se este desvio uma consequência do número de casas decimais que o programa Excel utiliza, ou seja, com uma maior precisão. No entanto, este desvio de 0,8% é desprezado no que diz respeito à fiabilidade do programa em relação ao método de Giroud (2010).

5.3.4. Situações reais

Nesta secção está em questão a validade da ferramenta numérica em situações reais, ou seja, na prática de uma obra. Pois, isto também implica a viabilidade dos métodos de dimensionamento implementados.

Relativamente aos métodos de dimensionamento, verificou-se a validade dos métodos e dos resultados obtidos. No entanto, não se despreza a necessidade de mais verificações dos métodos implementados na ferramenta, aplicando-a a mais exemplos de obra, e ainda a necessidade de usar mais métodos de dimensionamento para achar um geotêxtil mais adequado às necessidades e condicionantes globais que podem existir numa

obra. Salienta-se, no entanto, que algumas verificações realizadas são baseadas em situações reais.

Quanto à utilização da ferramenta numérica em situações reais, esta pode ser uma aplicação bastante útil. Como se refere na secção 5.1, o objectivo principal desta ferramenta é diminuir o tempo de dimensionamento e, por sua vez, o tempo de projecto. Pode-se confirmar que o dimensionamento de um filtro é mais rápido utilizando a ferramenta numérica.

Quanto à implementação do filtro, deve-se ter em conta as recomendações feitas pela ferramenta numérica, no que diz respeito à durabilidade, assim garantindo um bom desempenho do filtro ao longo da sua vida em obra.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Implementação

Um bom filtro não depende apenas de um bom dimensionamento. Considere-se na Figura 60 um processo recomendado para o desenvolvimento de um bom filtro.

Figura 60. Processo de desenvolvimento de um filtro

Antes de efectuar o dimensionamento de um filtro, são necessários alguns dados importantes, nomeadamente as condições fronteira. Logo, deve-se estudar as características granulométricas do solo a proteger, as condições hidráulicas do mesmo, o meio ambiente e outros condicionantes. Ou seja, realizar um estudo prévio da situação.

Segue-se o dimensionamento do filtro, que inclui a escolha dos métodos mais acertados, nomeadamente métodos que englobem todas as condicionantes a que o filtro será sujeito.

Uma vez obtidos valores e resultados do dimensionamento, estes são analisados objectivamente. Isto é, é avaliado se são fiáveis e se abrangem todos os critérios e condicionantes, assim pode-se seguir com o projecto do filtro.

Nisto, a utilização da ferramenta numérica abrange estes dois processos, o dimensionamento do filtro e a sua avaliação.

É importante que haja um projecto para a instalação do filtro, que inclua indicações sobre os equipamentos a usar e cuidados a ter, assim diminuindo as danificações durante a instalação do mesmo. Esta fase de instalação é a mais importante da vida do filtro, pois é nesta fase que existe o maior perigo de alterar as características pretendidas do filtro e por sua vez o desempenho. Deve haver contacto íntimo com o solos a proteger, as mantas geotêxteis devem ter uma sobreposição mínima de 300mm ou juntas costuradas, deve-se evitar o punçoamento pelos equipamentos de construção e evitar pedras angulosas [Pinho-Lopes (2009b)].

Durante o tempo útil da vida do filtro, recomenda-se que este seja inspeccionado, ou seja, periodicamente deve ser verificado o desempenho do filtro e daí estudar a necessidade de alguma manutenção.

A ferramenta numérica dispõe de conselhos e recomendações a ter em conta relativamente à durabilidade e à sobrevivência do filtro, garantindo assim o seu desempenho ao curto e longo prazo.

6.2. Ferramenta Numérica

Nesta secção resume-se o modo de utilização da ferramenta numérica, nomeadamente os cuidados a ter e os processos a seguir. A Figura 61 apresenta um processo de utilização da ferramenta numérica.

Figura 61. Processo de utilização da ferramenta numérica.

O primeiro passo de utilização da ferramenta numérica refere-se à compatibilidade, tanto entre a ferramenta numérica e o software informático, como entre o utilizador e a ferramenta numérica. O software informático deve ser compatível com o Excel, ainda, quando o utilizador abre a ferramenta numérica, deve verificar se as Macros e o ActiveX estão ligados. De uma segunda compatibilidade, o utilizador da ferramenta numérica deve possuir o mínimo conhecimento da funcionalidade do software, deve ainda ter noção do que se pretende tirar desta ferramenta.

Como se já mencionou em capítulos anteriores, é fundamental que os dados fornecidos pelo utilizador/projectista à ferramenta numérica sejam coerentes e mais próximos da realidade da obra. Deve ainda possuir e introduzir todos os dados que a ferramenta considera fundamental para o dimensionamento e ainda respeitar os avisos de erros no qual é alertado, e corrigir estes erros se necessário.

Obtendo resultados para o dimensionamento, o projectista deve avaliar estes resultados através de uma comparação de valores. Nisto, pode optar pelos valores que

pretende utilizar, tendo em conta as condições de obra. Ainda, o projectista deve possuir o mínimo de conhecimento para analisar estes resultados objectivamente.

Feita a escolha do filtro, o projectista deve ainda seguir as recomendações feitas pela ferramenta numérica, nomeadamente no que diz respeito a durabilidade e sobrevivência do filtro, para garantir um bom desempenho das suas funções ao curto e longo prazo.

Assim, a instalação do filtro deve considerar, entre outros, os cuidados referidos pela ferramenta numérica. Deste modo, garante uma boa instalação do filtro e por sua vez, um bom desempenho das suas exigências.

6.3. Objectividade

O principal objectivo deste estudo foi encontrar um modo eficaz de dimensionar filtros utilizados em obras de engenharia civil. Nisto, criou-se uma ferramenta numérica para a qual foram impostas várias exigências que, por sua vez, conduziram a um resultado mais elaborado. Logo, pretendeu-se criar uma ferramenta numérica para dimensionar filtros granulares e em geotêxtil com o objectivo de reduzir o tempo de dimensionamento, deste modo reduzindo o tempo de projecto e, por sua vez, os custos, sem diminuir a qualidade de filtro nem pôr em causa a segurança pública.

A Figura 62 é um gráfico representativo do desempenho da ferramenta numérica relativamente ao objectivo.

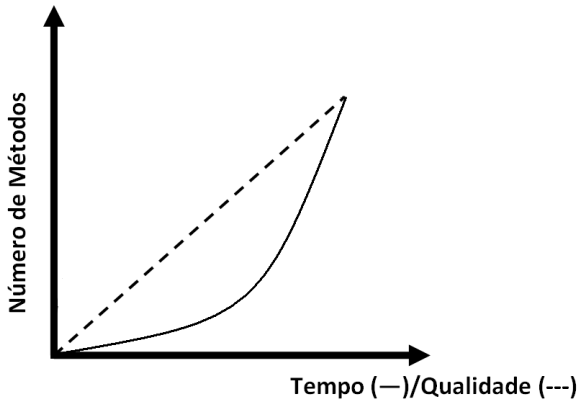


Figura 62. Gráfico de desempenho da ferramenta numérica.

Como é demonstrado, quanto maior for o numero de métodos utilizados, maior é a qualidade de resultados mas também mais tempo demora o dimensionamento. No entanto, uma vez que os métodos têm parâmetros iguais, a taxa de tempo de dimensionamento diminui com maior número de métodos, justifica-se o crescimento exponencial do gráfico.

Conclui-se que de um modo, cumpre-se o objectivo quando se pretende ter a maior qualidade de resultados, ou seja, utilizar mais métodos de dimensionamentos para uma análise qualitativa. No entanto, se pretende desprezar este tipo de análise, ou seja, utilizar um ou dois métodos, a ferramenta numérica demora mais tempo em termos de cálculos, mas deve-se ter em conta o facto que os métodos já estão apresentados, assim não se perde o tempo em os procurar, logo, a ferramenta numérica continua a ser mais rápido do que os cálculos manuais.

7. CONCLUSÕES

Para concluir, são discutidos três assuntos: os métodos de dimensionamento; a ferramenta numérica; o cumprimento dos objectivos da dissertação.

Relativamente aos métodos de dimensionamento:

- A evolução dos métodos implicou a introdução de novos critérios de dimensionamento e parâmetros adicionais;
- Os métodos de dimensionamento para filtros em geotêxtil têm como base os critérios implementados em filtros granulares;
- Os resultados de dimensionamento obtidos entre os métodos são muito variados, assim recomenda-se utilizar os valores máximos para o critério de permeabilidade e os valores mínimos para o critério de retenção. Isto aplica-se para ambos tipos de filtros;
- Quanto maior o número de métodos utilizados, melhor é a análise qualitativa do dimensionamento.

Relativamente à ferramenta numérica:

- Permite um dimensionamento de filtros granulares e em geotêxtil através de vários métodos de dimensionamento;
- Permite obter resultados fiáveis ao nível de cálculo mas, no entanto, a escolha de resultados a implementar dependem to projectista;
- Reduz o tempo de dimensionamento, principalmente quando se utilizam vários métodos de dimensionamento, não reduzindo o tempo significativamente quando se utilizam poucos métodos. No entanto, a utilização da ferramenta numérica preparada é mais rápida do que a aplicação manual dos mesmos métodos.
- Salienta-se a necessidade de implementar mais métodos de dimensionamento, e ainda fazer melhorias de forma a tornar a ferramenta ainda mais “user friendly”.

Relativamente aos objectivos da dissertação, este é cumprido, apesar que o título da tese não incluir filtros granulares devido a limitação de caracteres imposto pela Universidade de Aveiro.

8. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A ferramenta numérica demonstra que tem o potencial para ser uma ferramenta útil para o projecto de obras com filtros, ainda demonstra ter o potencial de ser comercializada como uma ferramenta de aplicação, não só para projectistas de estas obras de engenharia civil, mas também para empresas fornecedoras de geotêxteis.

É da opinião do autor desta dissertação que esta ferramenta terá uma maior valia como uma aplicação na internet, onde qualquer projectista ou fornecedor que pretenda dimensionar um filtro poderá ter acesso.

Salienta-se que será necessário fazer melhorias e testes adicionais à ferramenta numérica antes de a transformar numa aplicação de internet. Mas, uma vez que a linguagem informática para a implementação da ferramenta numérica na internet é semelhante à linguagem usada no Visual Basic, esta implementação será possível. Assim, também protegendo os dados da ferramenta, e por sua vez proteger os direitos de autor, no caso de esta aplicação ser comercializada.

Com base de metodologia usada para criar esta ferramenta numérica para a função de filtragem, é possível utilizar as mesmas ideias para a criação de outras ferramentas numéricas para diferentes funções, tais como os que estão mencionadas na secção 1.2. Assim, expandindo o campo de utilização da ferramenta numérica, e em caso de comercialização de aplicação, uma maior dimensão de clientela.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.S.T.M. (2009a) - *"D4491",* Standard Test Methods for Water Permeability of Geotextiles by Permittivity.

A.S.T.M. (2009b) - *"D4595",* Standard Test Method for Tensile Properties of Geotextiles by the Wide-Width Strip Method.

A.S.T.M. (2003) - *"D4716",* Determinação das características de permeabilidade à água - no plano do geossintético.

A.S.T.M. (2006) - *"D5101",* Standard Test Method for Measuring the Soil-Geotextile System Clogging Potential by the Gradient Ratio.

A.S.T.M. (2009c) - *"E11",* Standard Specification for Wire Cloth and Sieves for Testing Purposes.

A.S.T.M. (1997) - *"M 288",* Standard Specification for Geotextiles.

Artieres, O. e Tcherniavsky, J.G. (2002) - "*Geotextile filtration systems for dams - 30 years of improvement",* 7º ICG, Lisse. 2002 Swets e Zeitlinger. pp 969-974.

BATHRUST, R.J. (1996) - *"IGS-Classificação dos Geossintéticos",* 2 p. (Traduzido por: Marianna J.A. Mendes)

Bertram, G.E. (1940) - *"An Experimental Investigation of Protective Filters"*, Soil Mechanics, Series No. 7, Publication No. 267, Graduate School of Engineering, Harvard University, Cambridge, MA, pp 1-21.

C.E.N. (2005b) - *"EN ISO 10318: 2005",* Geosynthetics-Termas and Definitions.

C.E.N. (2010) - *"EN ISO 12956: 2010",* Geotextiles and geotextile-related products - Determination of the characteristic opening size.

C.E.N. (2006) - *"NP EN ISO 9863",* Geossintéticos - Determinação da espessura a pressões especificas.

C.E.N. (2005a) - *"NP EN ISO 12958",* Determinação das características de permeabilidade à água - no plano do geossintético.

Calhoun, C.C. Jr. (1972) - *"Development of Design Criteria and Acceptance Specifications for Plastic Filter Cloths",* US Army Waterways Experiment Station Technical Report, Vicksburg, Mississippi, no. S-72-7, p. 83.

Carneiro, J.R.; Almeida, P.J. e Lopes, M.L. (2006b) - "*Durabilidade de geotexteis expostos a diversos factores climatericos ",* Proceedings of the 10º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa. vol. 2, 10 p.

Carneiro, J.R.; Almeida, P.J. e Lopes, M.L. (2006a) - "*A importância da incorporação de aditivos químicos nos geotêxteis de polipropileno",* Proceedings of the 10.º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa. vol. 2, 10 p.

Christopher, B.R. (1998) - *"The First Step in Geotextile Filter Design",* Geotechnical Fabrics Report, IFAI, St. Paul, Minnesota, pp 36-39.

Christopher, B.R. e Holtz, R.D. (1985) - *"Geotextile Engineering Manual",* Federal Highway Administration, Washington DC, Report No. FHWA-TS-86/203. 1044 p.

Cooke, T.F. e Rebenfeld, L. (1988) - *"Effect of chemical composition and physical structure of geotextiles on their durability",* Geotextiles and Geomembranes, vol. 7, pp 7-22.

D.D.U.S.A. (2004) - *"Engineering use of geotextiles",* Filtration and Drainage. Departement of Defense of the USA, pp 31-35.

F.C.G.G (1989) - *"Geotextile Manual",* French Committee on Geotextiles and Geomembranes, Bagneux, France, 64 p.

F.C.G.G (1984) - *"Recommendations for the Reception and Handling of Geotextiles - French Test Standards",* French Committee on Geotextiles and Geomembranes, Paris, 41 p.

F.H.W.A. (1998) - *"Geosynthetic Design and Construction Guidelines",* National Highway Institute, Virginia, USA, pp. 460.

Fannin, J. (2004) - "*AASHTO M288: Durability Considerations in Standard Specification Documents",* Proceedings of the 57th Canadian Geotechnical Conference and the 5th Joint CGS/IAH-CNC Conference, Quebeque, Canada. pp 21-26.

Faure, H. e Fry, J. (2004) - "*Rétention et colmatage des géotextiles",* Proceedings of the 5º Rencontres Géosynthétiques Francophones 2003/2004, Colmar. pp 41-66.

Faure, Y.; Gourc, J.P.; Millot, F. e Sunjoto, S. (1986) - "*Theoretical and Experimental determination of the filtration opening size of geotextiles",* Proceedings of the Third International Conference on Geotextiles, Vienna. vol. 4, pp 1275-1280.

Faure, Y.H. e Lelay, M. (2002) - "*Behaviour of geotextile filter for bank protection: full scale laboratory experimentation",* Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics, Nice, France. pp 609-612.

Fibertex (2006a) - *"Engenharia Civil-Geotêxteis Fibertex"*, <http://www.fibertex.com/en-GB/business-areas/Geotextiles/Brochures/Pages/default.aspx>, Consultado em 30/10/2010, 8 p.

Fibertex (2006b) - *"Guia de projecto"*, Fibertex Nonwovens, <http://www.fibertex.com/en-GB/business-areas/Geotextiles/Brochures/Pages/default.aspx>, Consultado em 11/11/2010, 20 p.

Foster, M.A. e Fell, R. (1999) - *"Assessing embankment dam filters which do not satisfy design criteria",* School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, ISBN: 85841 343 3, ISSN 0077-880X, UNICIV Report no. R-376.

FOUBERT, F. (2009) - *"European and International Geotextile Standards (revised version)",* NP EN ISO 10318. 12 p.

Freitas, R.A.S. (2003) - *"Comportamento de geotêxteis como filtro de resíduos - fosfogesso e lama vermelho",* Universidade Federal do Rio de Janeiro
Rio de Janeiro, 131 p.

G.E.O. (1993) - *"Guide to Retaining Wall Design",* GEOTECHNICAL ENGINEERING OFFICE, Hong Kong, Second Edition.

G.E.O.H.K. (1993) - *"Review of granular and geotextile filters",* CIVIL ENGINEERING DEPARTEMENT, Geotechnical Engineering Office, Hong Kong, 133 p.

Giroud, J.P. (1981) - *"Designing with geotextiles",* Materiaux et Constrictions, vol. 14, no. 82, pp 257-272.

Giroud, J.P. (2010) - "*Developement of criteria for geotextile and granular filters",* 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil. vol. 1. pp 45-64.

Giroud, J.P. (2005) - "*Geosynthetics engineering: successes, failures and lessons learned",* The Vienna Terzaghi Lecture, Yokohama. 84 p.

Giroud, J.P. (2006)- *"Geosynthetics in Drainage and Filtration"*, Training Course on Geosynthetics, IGS EDUCATION COMITTEE, Yokohama, 82 scr.

Giroud, J.P. (1996) - "*Granular Filters and Geotextile Filters",* Proceedings of the Geofilters '96 Conference, Montreal, Quebec. École Polytechnique de Montreal. pp. 565-680.

Halse, Y.H.; Koerner, R.M. e Lord, A.E. Jr. (1987a) - *"Effect of high levels of alkalinity on geotextiles. Part 1: $Ca(OH)_2$ solutions",* Geotextiles and Geomembranes, vol. 5, pp 261-282.

Halse, Y.H.; Koerner, R.M. e Lord, A.E. Jr. (1987b) - *"Effect of high levels of alkalinity on geotextiles. Part 2: NaOH solution",* Geotextiles and Geomembranes, vol. 6, pp 295-306.

Hameiri, A. e Fannin, R.J. (1999) - "*Geotextile filtration performance under conditions of severe vibration",* Proceedings of the Geosynthetics '99, Boston. pp 671-680.

Hazen, A. (1892) - *"Physical Properties of Sands and Gravels with Special Reference to their Use in Filtration",* 24th Annual Report, Massachusetts State Board of Health, 539 p.

Heerten, G. (1982) - "*Dimensioning the filtration properties of geotextiles",* Proceedings of the Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas. vol. 1, pp 115-120.

Heerten, G. (1986) - "*Functional design of filters using geotextiles",* Proceedings of the Third International Conference on Geotextiles, Vienna. vol. 4, pp 1191-1196.

Heibaum, M.; Fourie, A.; Girard, H.; Karunaratne, G.P.; Lafleur, J. e Palmeira, E.M. (2006) - "*Hydraulic applications of geosynthetics",* Proceedings of the 8th International Conference on Geosynthetics, Yokohama. Millpress, Rotterdam. pp 79-120.

Honjo, Y. e Veneziano, D. (1989) - *"Improved Filter Criterion for Cohesionless Soils",* Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, vol. 115, no. 1, pp 75-94.

I.G.S. (2009) - *"Geotextile Standards",* Funções. International Geosynthetics Society, 1 p.

I.G.S. (2006) - *"Guide to the Specification of Geosynthetics",* International Geosynthetics Society, 94pgs.

I.S.O. (1999) - *"ISO 11058",* Determinação das características de permeabilidade à água - normal ao plano.

Indraratna, B. e Locke, M. (2000) - *"Analytical Modelling and Experimental Verification of Granular Filter Behaviour",* 8 pgs.

Indraratna, B. e Vafai, F. (1997) - *"Analytical model for particle migration within base soil-filter system",* Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, vol. 123(2), pp 100-109.

Kenney, T.C.; Chahal, R.; Chiu, E.; Ofoegbu, G.I.; Omange, G.N. e Ume, C.A. (1985) - *"Controlling constriction size of granular filters",* Canadian Geotechnical Journal, vol. 22, pp 32-43.

Kenney, T.C. e Lau, D. (1985) - *"Internal stability of granular filters",* Canadian Geotechnical Journal, vol. 22, pp 215-225.

Kenney, T.C. e Lau, D. (1986) - *"Reply to Discussion on "Internal stability of granular filters"",* Canadian Geotechnical Journal, vol. 23, pp 420-423.

Koerner, R.M. (1999) - *"Designing with Geosynthetics"*, Fourth Edition, Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA, ISBN 0-13-726175-6, 761p.

Kozeny, J. (1927) - *"Über Kapillare Leitung des Wassers in Boden",* pp 136a-271.

Lafleur, J; Mlynarek, J e Rollin, A. (1989) - *"Filtration of Broadly Graded Cohesionless Soils",* Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 115(12), pp. 1747-1768.

Lafleur, J. (1999) - *"Selection of geotextiles to filter broadly graded cohesionless soils",* Geotextiles and Geomembranes, vol. 17, pp 299-312.

Lawson, C.R. e Curiskis, J.I. (1985) - *"Geotextiles: Including Manufacture, Properties, and Use in Pavementes, Embankments, Subsurface Drainage and Erosion Cantrol"*, Lawson Consulting, Sydney, 193 p.

Martins (2000) - *"Capitulo 3"*, Repositório Internacional de Universidade de Brasília, <http://repositorio.bce.unb.br/bitstream/10482/3317/3/Capitulos_3_4_5.pdf>, Consultado em 6/6/2011, 72 p.

Milligan, V. (1986) - *"Discussion on "Internal stability of granular filters" by Kenney and Lau (1985)",* Canadian Geotechnical Journal, vol. 23, pp 414-418.

MIRAFI (2010) - *"Geotextile filter design, application, and product selection guide",* 31/10/210, Ten Cate Nicolon, 12 p.

Mlynarek, J. (1998a) - "*Designing geotextile filters part 1: Soil filtration",* 51st Canadian Geotechnical Society Conference, Edmonton. Group CTT. pp 145-151.

Mlynarek, J. (2000) - "*Geo drains and geo filters - Retrospective and future trends",* Proceedings of the Third International Conference on Geofilters 2000, Warsaw. pp 27-47.

Mlynarek, J. (1998b) - "*Geotextiles - Designing for filtration",* 51st Canadian Geotechnical Society Edmonton. pp 98-121.

Moraci, N. e Mandaglio, M.C. (2008) - "*The Design of Geotextile Filters for Granular Soils",* Proceedings of the The First Pan American Geosynthetics Conference and Exhibition, Cancun, Mexico. pp 477-486.

Muñoz, C.S. (2005) - *"Desempenho de geotêxteis na filtração de solos internamente instáveis",* Tese de mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 119 p.

Newton, C.T. e Hurley, H.W. (1940) - *"Investigation to Determine the Practical Application of Natural Bank Gravel as a Protective Filter for an Earth Embankment",* Massachusetts Institute of Technology.

Paula, A.M.V. (2003) - *"Danificação durante a instalação – avaliação laboratorial da influência no comportamento dos geossintéticos",* Faculdade de Engenharia. Mestre em Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Universidade do Porto, Porto, 176 p.

Pinho-Lopes, M. (2009c)- *"Aplicações de Geossintéticos em Engenharia Civil – Ensaios"*, Acetatos de apoio à leccionação da unidade curricular Aplicações de Geossintéticos em Engenharia Civil, 2º ano do mestrado em Engenharia Civil (2º ciclo), Universidade de Aveiro, 62 scr.

Pinho-Lopes, M. (2009b)- *"Aplicações de Geossintéticos em Engenharia Civil – Filtragem"*, Acetatos de apoio à leccionação da unidade curricular Aplicações de Geossintéticos em Engenharia Civil, 2º ano do mestrado em Engenharia Civil (2º ciclo), Universidade de Aveiro, 28 scr.

Pinho-Lopes, M. (2009a) - *"Aplicações de Geossintéticos em Engenharia Civil – Sistemas de drenagem"*, Textos de apoio à leccionação da unidade curricular Aplicações de Geossintéticos em Engenharia Civil, 2º ano do mestrado em Engenharia Civil (2º ciclo), Universidade de Aveiro, 23 p.

Pinho-Lopes, M. e Lopes, M. Lurdes (2010) - *"A Durabilidade dos Geossintéticos"*, FEUP EDIÇÕES, Colecção Monografias, ISBN: 978-972-752-120-3, 294 p.

Ramos, F.D. e Locke, M. (2000) - "*Design of granular filters: Guidlines and recommendations for laboratory testing",* Filters and Drainage in Geotechnical and Environmental Engineering, Rotterdam.

Rankilor, R.R. (1981) - *"Membranes in Ground Engineering",* JOHN WILEY AND SONS, Chichester, 377 p.

Robert, E. Mackey e Koerner, George R. (2009) - *"Biological Clogging of Geotextile Filters - A Five Year Study",* USA, 16 p.

Rodriguez, F. (1985) - *"Principles of Polymer Systems (Second Edition)"*, MCGRAW-HILL, Singapore, 282 p.

Rose, H.E. (1950) - "*Fluid flow through beds of granular material. Some Aspects of Fluid Flow",* Proceedings of the Conference of the Institution of Physics. vol. 136, p.

Scheurenberg, R.J. (1986) - "*Internal Stability of Granular Filters",* Proceedings of the Symposium on Filters, South African Institution of Civil Engineers.

Sherard, J.L. e Dunnigan, L.P. (1986) - *"Discussion on "Internal stability of granular filters" by Kenney and Lau (1985)",* Canadian Geotechnical Journal, vol. 23, pp 418-420.

Sherard, J.L. e Dunnigan, L.P. (1985) - "*Filters and Leekage Control in Embankment Dams",* Proceedings of the Seepage and Leakage from Dams and Impoundments. pp 1-30.

Sherard, J.L.; Dunnigan, L.P. e Talbot, J.R. (1984a) - *"Basic Properties of sand and gravel filters",* Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, vol. 110, pp 684-700.

Sherard, J.L.; Dunnigan, L.P. e Talbot, J.R. (1984b) - *"Filters for clays and silts",* Journal of Geotechnical Engineering, American Society of Civil Engineers, vol. 110, pp 701-718.

Silveira, A. (1965) - "*An analysis of the problem of washing-through in protective filters",* Proceedings of the Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal. vol. 2, pp 551-555.

T.R.I. (2011) - *"Geosynthetic Testing Laboratories",* Geosynthetic Test Standards. TRI Environmental, Inc., Texas, USA, 5 p.

Terzaghi, K. (1922) - *"Bon-Hanifia Dam, North Africa",* (Umpublished report quoted by Bertram, 1940)

Troost, G.H. e Hoedt, G. den (1984) - "*Resistance of geotextiles to physical, chemical and microbiological attacks",* Nationales Symposium Geotextilien im Erd-und Grundbau, Koln, West Germany. pp 91-96.

U.S.B.R. (1955) - *"The use of laboratory tests to develop design criteria for protective filters",* Earth Laboratory Report no. EM-425. 12 p 11 figuras.

U.S.C.E. (1953) - *"Filter Experiments and Design Criteria",* WATERWAYS EXPERIMENT STATION UNITED STATES CORPS OF ENGINEERS, Vicksburg, Technical Memorandum no. 3-360, 52 p.

Vaughan, P.R. e Soares, H.F. (1982) - *"Design of filters for clay cores dams",* ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division, vol. 108 (GT1), pp 17-31.

Vidal, Delma Mattos (2009) - *"Geotêxtil: Propriedades e Ensaios"*, Bidim, <http://www.impercia.com.br/pt-br/site.php?secao=tecnologias>, Consultado em 20/06/2011, 43p.

Wittman, L. (1979) - "*The process of soil filtration - its physics and the approach in engineering practice",* Proceedings of the Seventh European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Brighton. vol. 1, pp 303-310. (Discussion vol. 4, pp 223)

Wolski, W. (1987) - "*Filters - General Report",* Proceedings of the Ninth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dublin. vol. 3, pp 1351-1366.

Yasrobi, S.S. e Azad, A. (2004a) - "*Assessment of Granular Filter Functioning in Embankment Dams",* Proceedings of the EuroSoil 2004 Conference, Freiburg, Germany. 8 p.

Yasrobi, S.S. e Azad, A. (2004b) - "*Laboratory Simulation, the Best Method to Critical Granular Filter Design",* Proceedings of the 2nd International Conference on Erosion and Scoring, Singapore. vol. 2, pp 421-428.

Zanten, R.V. Van (1986) - *"Geotextiles and Geomembranes in Civil Engineering"*, Balkema Publishers, Rotterdam, 658 p.

Zhao, Z.K.; Chew, S.H.; Karunaratne, G.P.; Tan, S.A.; Delmas, Ph. e Loke, K.H. (2000) - "*Revetmente geotextile filter subjected to cyclic wave loading",* Proceedings of the GeoDenver 2000 Congress, Denver, Colorado. p. 162-175. 0784405158.

ANEXO

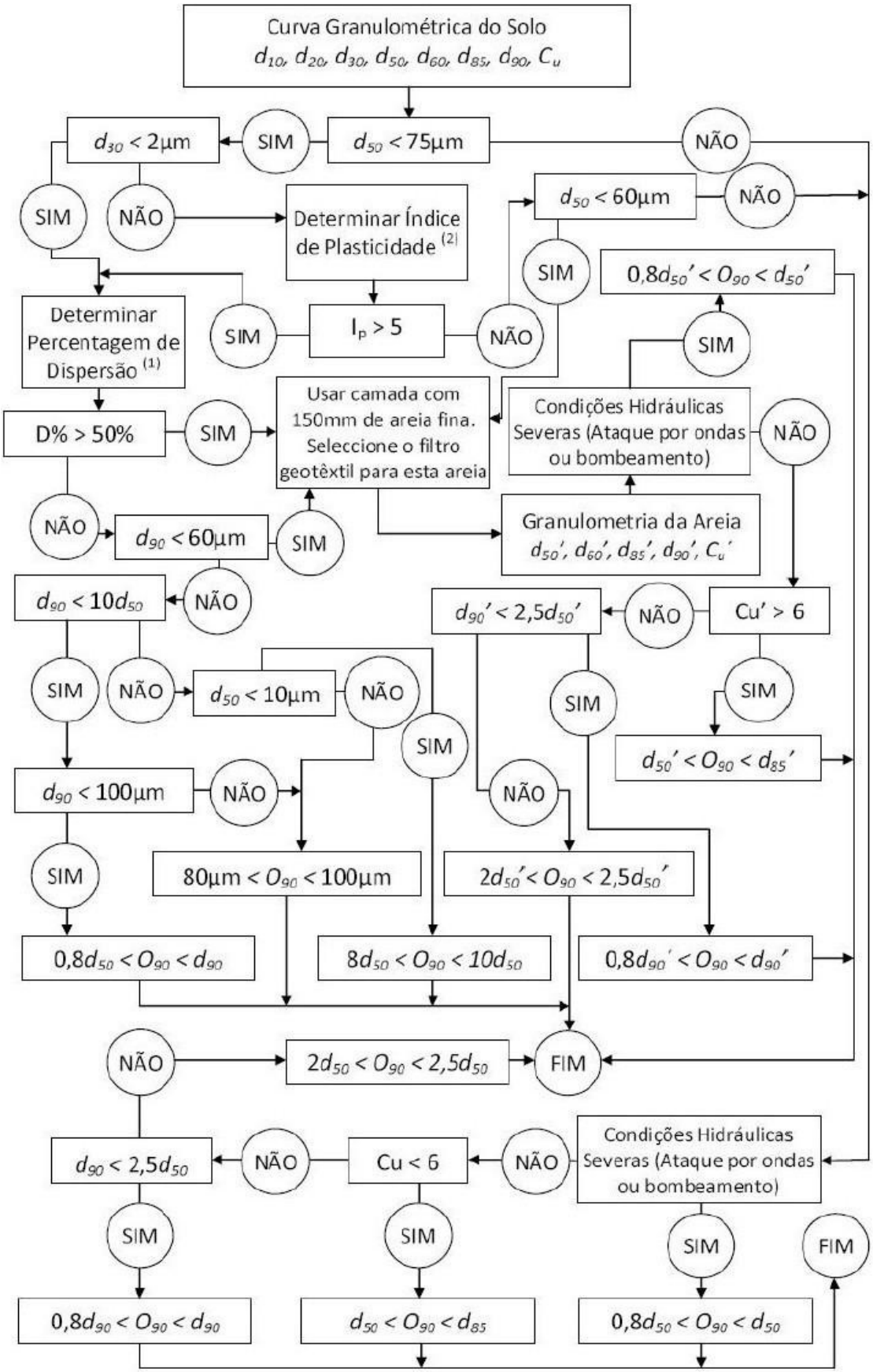


Figura A - 1. Critério de selecção para um filtro de geotêxtil em condições de fluxo bidireccional (retenção e colmatação) Mlynarek (1998b).

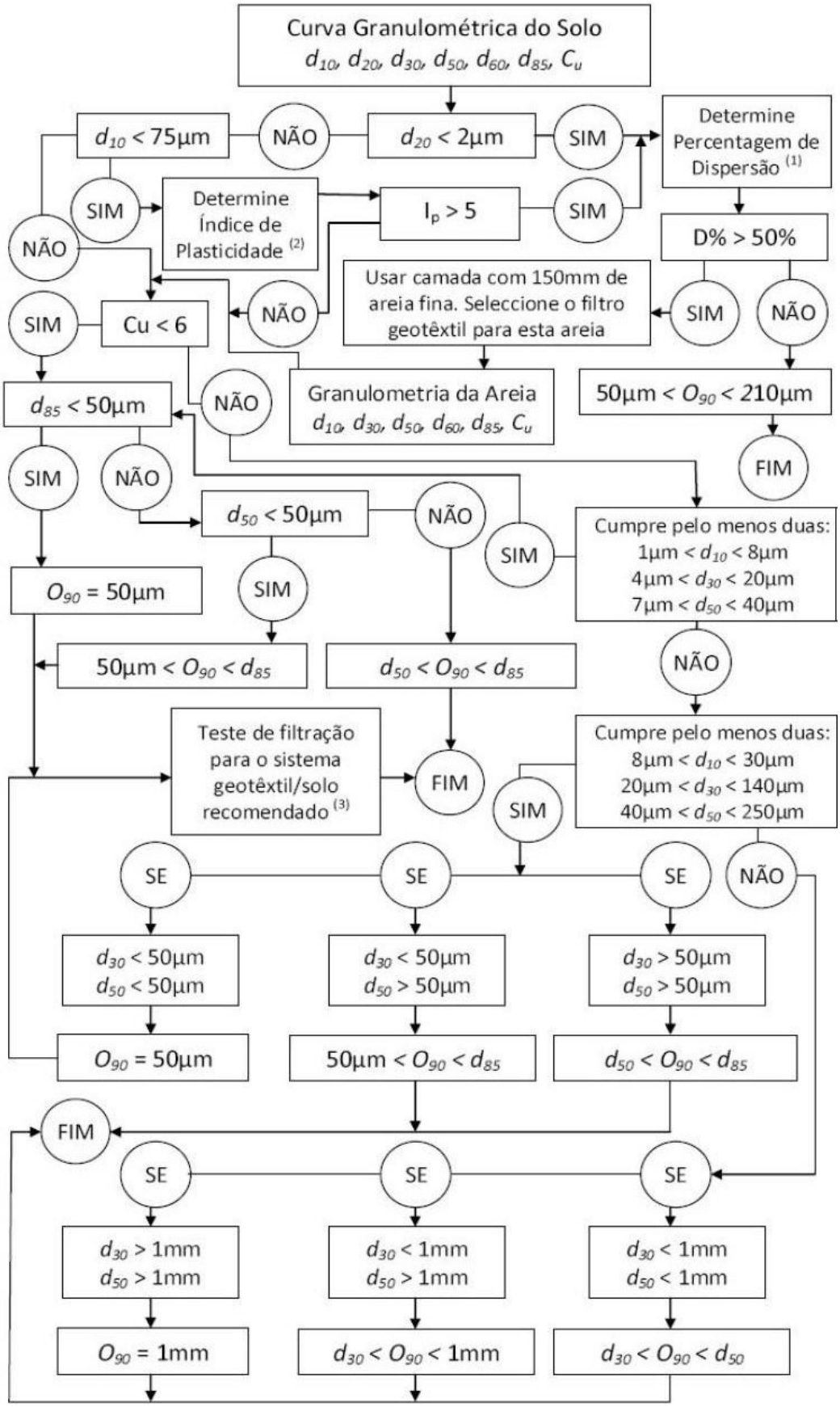


Figura A - 2. Critério de selecção para um filtro de geotêxtil em condições de fluxo unidireccional (retenção e colmatação) Mlynarek (1998b).

Quadro A - 1. Caminhos possíveis do fluxograma. Fluxo bidireccional Mlynarek (1998a).

$0{,}8 \cdot d_{50} < O_{90} < d_{90}$		
A	1	$d_{50} < 0{,}075mm$
	2	$d_{30} < 0{,}002mm$
	3	D ≤ 50%
	4	$d_{90} \geq 0{,}06mm$
	5	$d_{90} < 10 \cdot d_{50}$
	6	$d_{90} < 0{,}1mm$
B	1	$d_{50} < 0{,}075mm$
	2	$d_{30} \geq 0{,}002mm$
	3	$I_P > 5$
	4	D ≤ 50%
	5	$d_{90} \geq 0{,}06mm$
	6	$d_{90} < 10 \cdot d_{50}$
	7	$d_{50} < 0{,}01mm$

$d_{50} < O_{90} < d_{85}$ *		
A	1	$d_{50} \geq 0{,}075mm$
	2	Condições hidráulicas NÃO *severas*
	3	$C_u < 6$
B	1	$d_{50} < 0{,}075mm$
	2	$d_{30} \geq 0{,}002mm$
	3	$I_P \leq 5$
	4	$d_{50} \geq 0{,}06mm$
	5	Condições hidráulicas NÃO *severas*
	6	$C_u < 6$
*Areia Fina	1	Condições hidráulicas NÃO *severas*
	2	$C_u' > 6$

$2 \cdot d_{50} < O_{90} < 2{,}5 \cdot d_{50}$ *		
A	1	$d_{50} \geq 0{,}075mm$
	2	Condições hidráulicas NÃO *severas*
	3	$C_u \geq 6$
	4	$d_{90} \geq 2{,}5 \cdot d_{50}$
B	1	$d_{50} < 0{,}075mm$
	2	$d_{30} \geq 0{,}002mm$
	3	$I_P \leq 5$
	4	$d_{50} \geq 0{,}06mm$
	5	Condições hidráulicas NÃO *severas*
	6	$C_u \geq 6$
	7	$d_{90} \geq 2{,}5 \cdot d_{50}$
*Areia Fina	1	Condições hidráulicas NÃO *severas*
	2	$C_u' \leq 6$
	3	$d_{90}' \geq 2{,}5 \cdot d_{50}'$

$8 \cdot d_{50} < O_{90} < 10 \cdot d_{50}$		
A	1	$d_{50} < 0{,}075mm$
	2	$d_{30} < 0{,}002mm$
	3	D ≤ 50%
	4	$d_{90} \geq 0{,}06mm$
	5	$d_{90} \geq 10 \cdot d_{50}$
	6	$d_{50} < 0{,}01mm$
B	1	$d_{50} < 0{,}075mm$
	2	$d_{30} \geq 0{,}002mm$
	3	$I_P > 5$
	4	D ≤ 50%
	5	$d_{90} \geq 0{,}06mm$
	6	$d_{90} \geq 10 \cdot d_{50}$
	7	$d_{50} < 0{,}01mm$

Quadro A - 1. Continuação.

$0{,}8 \cdot d_{90} < O_{90} < d_{90}$ *

A	1	$d_{50} \geq 0{,}075mm$
	2	Condições hidráulicas NÃO *severas*
	3	$C_u \geq 6$
	4	$d_{90} < 2{,}5 \cdot d_{50}$
B	1	$d_{50} < 0{,}075mm$
	2	$d_{30} \geq 0{,}002mm$
	3	$I_P \leq 5$
	4	$d_{50} \geq 0{,}06mm$
	5	Condições hidráulicas NÃO *severas*
	6	$C_u \geq 6$
	7	$d_{90} < 2{,}5 \cdot d_{50}$
*Areia Fina	1	Condições hidráulicas NÃO *severas*
	2	$C_u' \leq 6$
	3	$d_{90}' < 2{,}5 \cdot d_{50}'$

Necessidade de camada de *Areia Fina*

A	1	$d_{50} < 0{,}075mm$
	2	$d_{30} \geq 0{,}002mm$
	3	$I_P \leq 5$
	4	$d_{50} < 0{,}06mm$
B	1	$d_{50} < 0{,}075mm$
	2	$d_{30} \geq 0{,}002mm$
	3	$I_P > 5$
	4	D > 50%
C	1	$d_{50} < 0{,}075mm$
	2	$d_{30} \geq 0{,}002mm$
	3	$I_P > 5$
	4	D ≤ 50%
	5	$d_{90} < 0{,}06mm$
D	1	$d_{50} < 0{,}075mm$
	2	$d_{30} < 0{,}002mm$
	3	D ≤ 50%
	4	$d_{90} < 0{,}06mm$
E	1	$d_{50} < 0{,}075mm$
	2	$d_{30} < 0{,}002mm$
	3	D > 50%

$0{,}08mm < O_{90} < 0{,}1mm$

A	1	$d_{50} < 0{,}075mm$
	2	$d_{30} < 0{,}002mm$
	3	D ≤ 50%
	4	$d_{90} \geq 0{,}06mm$
	5	$d_{90} < 10 \cdot d_{50}$
	6	$d_{90} \geq 0{,}1mm$
B	1	$d_{50} < 0{,}075mm$
	2	$d_{30} \geq 0{,}002mm$
	3	$I_P > 5$
	4	D ≤ 50%
	5	$d_{90} \geq 0{,}06mm$
	6	$d_{90} \geq 10 \cdot d_{50}$
	7	$d_{50} \geq 0{,}01mm$
C	1	$d_{50} < 0{,}075mm$
	2	$d_{30} < 0{,}002mm$
	3	D ≤ 50%
	4	$d_{90} \geq 0{,}06mm$
	5	$d_{90} \geq 10 \cdot d_{50}$
	6	$d_{90} \geq 0{,}1mm$
D	1	$d_{50} < 0{,}075mm$
	2	$d_{30} \geq 0{,}002mm$
	3	$I_P > 5$
	4	D ≤ 50%
	5	$d_{90} \geq 0{,}06mm$
	6	$d_{90} \geq 10 \cdot d_{50}$
	7	$d_{90} \geq 0{,}1mm$

$0{,}8 \cdot d_{50} < O_{90} < d_{50}$ *

A	1	$d_{50} \geq 0{,}075mm$
	2	Condições hidráulicas *severas*
B	1	$d_{50} < 0{,}075mm$
	2	$d_{30} \geq 0{,}002mm$
	3	$I_P \leq 5$
	4	$d_{50} < 0{,}06mm$
	5	Condições hidráulicas *severas*
*Areia Fina	1	Condições hidráulicas *severas*

Quadro A - 2. Caminhos possíveis do fluxograma. Fluxo unidireccional [Mlynarek (1998a)].

$0{,}05mm < O_{90} < 0{,}21mm$		
A	1	$d_{20} < 0{,}002mm$
	2	D ≤ 50%
B	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$
	2	$d_{10} < 0{,}075mm$
	3	$I_P > 5$
	4	D ≤ 50%

Quadro A – 2. Continuação.

$0{,}05mm < O_{90} < d_{85}$ *		
A Areia Fina*	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$
	2	$d_{10} \geq 0{,}075mm$
	3*	$C_u < 6$
	4*	$d_{85} \geq 0{,}05mm$
	5*	$d_{50} < 0{,}05mm$
B	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$
	2	$d_{10} < 0{,}075mm$
	3	$I_P \leq 5$
	4	$C_u < 6$
	5	$d_{85} \geq 0{,}05mm$
	6	$d_{50} < 0{,}05mm$
C Areia Fina*	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$
	2	$d_{10} \geq 0{,}075mm$
	3*	$C_u \geq 6$
	4*	$0{,}001mm < d_{10} < 0{,}008mm$ $0{,}004mm < d_{30} < 0{,}02mm$ ou $0{,}001mm < d_{10} < 0{,}008mm$ $0{,}007mm < d_{50} < 0{,}04mm$ ou $0{,}004mm < d_{30} < 0{,}02mm$ $0{,}007mm < d_{50} < 0{,}04mm$
	5*	$d_{85} \geq 0{,}05mm$
	6*	$d_{50} < 0{,}05mm$
D	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$
	2	$d_{10} < 0{,}075mm$
	3	$I_P \leq 5$
	4	$C_u \geq 6$
	5	$0{,}001mm < d_{10} < 0{,}008mm$ $0{,}004mm < d_{30} < 0{,}02mm$ ou $0{,}001mm < d_{10} < 0{,}008mm$ $0{,}007mm < d_{50} < 0{,}04mm$ ou $0{,}004mm < d_{30} < 0{,}02mm$ $0{,}007mm < d_{50} < 0{,}04mm$
	6	$d_{85} \geq 0{,}05mm$
	7	$d_{50} < 0{,}05mm$
Recomenda-se testes de filtragem segundo método SAGEOS GX003, método modificado de ASTM D5101		

Quadro A – 2. Continuação.

O_{90} = 0,05*mm* *		
A Areia Fina*	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$
	3*	$d_{10} \geq 0{,}075mm$
	4*	$C_u < 6$
	5*	$d_{85} < 0{,}05mm$
B	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$
	2	$d_{10} < 0{,}075mm$
	3	$I_P \leq 5$
	4	$C_u < 6$
	5	$d_{85} < 0{,}05mm$
C Areia Fina*	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$
	2	$d_{10} \geq 0{,}075mm$
	3*	$C_u \geq 6$
	4*	$0{,}001mm < d_{10} < 0{,}008mm$ $0{,}004mm < d_{30} < 0{,}02mm$ ou $0{,}001mm < d_{10} < 0{,}008mm$ $0{,}007mm < d_{50} < 0{,}04mm$ ou $0{,}004mm < d_{30} < 0{,}02mm$ $0{,}007mm < d_{50} < 0{,}04mm$
	5*	$d_{85} < 0{,}05mm$
D	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$
	2	$d_{10} < 0{,}075mm$
	3	$I_P \leq 5$
	4	$C_u \geq 6$
	5	$0{,}001mm < d_{10} < 0{,}008mm$ $0{,}004mm < d_{30} < 0{,}02mm$ ou $0{,}001mm < d_{10} < 0{,}008mm$ $0{,}007mm < d_{50} < 0{,}04mm$ ou $0{,}004mm < d_{30} < 0{,}02mm$ $0{,}007mm < d_{50} < 0{,}04mm$
	6	$d_{85} < 0{,}05mm$
Recomenda-se testes de filtragem segundo método SAGEOS GX003, método modificado de ASTM D5101		

Quadro A – 2. Continuação.

O_{90} = 0,05*mm* *					
A Areia Fina*	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$	B	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$
	2	$d_{10} \geq 0{,}075mm$		2	$d_{10} < 0{,}075mm$
	3*	$C_u \geq 6$		3	$I_P \leq 5$
	4*	$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$		4	$C_u \geq 6$
		$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$		5	$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$
		ou			$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$
		$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$			ou
		$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$			$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$
		ou			$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$
		$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$			ou
		$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$			$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$
	5*	$0{,}008mm < d_{10} < 0{,}03mm$			$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$
		$0{,}02mm < d_{30} < 0{,}14mm$		6	$0{,}008mm < d_{10} < 0{,}03mm$
		ou			$0{,}02mm < d_{30} < 0{,}14mm$
		$0{,}008mm < d_{10} < 0{,}03mm$			ou
		$0{,}04mm < d_{50} < 0{,}25mm$			$0{,}008mm < d_{10} < 0{,}03mm$
		ou			$0{,}04mm < d_{50} < 0{,}25mm$
		$0{,}002mm < d_{30} < 0{,}14mm$			ou
		$0{,}04mm < d_{50} < 0{,}25mm$			$0{,}002mm < d_{30} < 0{,}14mm$
	6*	$d_{30} < 0{,}05mm$			$0{,}04mm < d_{50} < 0{,}25mm$
		$d_{50} < 0{,}05mm$		7	$d_{30} < 0{,}05mm$
					$d_{50} < 0{,}05mm$
			Recomenda-se testes de filtragem segundo método SAGEOS GX003, método modificado de ASTM D5101		

Quadro A – 2. Continuação.

$0{,}05mm < O_{90} < d_{85}$ *					
A Areia Fina*	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$	B	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$
	2	$d_{10} \geq 0{,}075mm$		2	$d_{10} < 0{,}075mm$
	3*	$C_u \geq 6$		3	$I_P \leq 5$
	4*	$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$		4	$C_u \geq 6$
		$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$		5	$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$
		ou			$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$
		$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$			ou
		$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$			$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$
		ou			$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$
		$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$			ou
		$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$			$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$
	5*	$0{,}008mm < d_{10} < 0{,}03mm$			$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$
		$0{,}02mm < d_{30} < 0{,}14mm$		6	$0{,}008mm < d_{10} < 0{,}03mm$
		ou			$0{,}02mm < d_{30} < 0{,}14mm$
		$0{,}008mm < d_{10} < 0{,}03mm$			ou
		$0{,}04mm < d_{50} < 0{,}25mm$			$0{,}008mm < d_{10} < 0{,}03mm$
		ou			$0{,}04mm < d_{50} < 0{,}25mm$
		$0{,}002mm < d_{30} < 0{,}14mm$			ou
		$0{,}04mm < d_{50} < 0{,}25mm$			$0{,}002mm < d_{30} < 0{,}14mm$
	6*	$d_{30} < 0{,}05mm$			$0{,}04mm < d_{50} < 0{,}25mm$
		$d_{50} > 0{,}05mm$		7	$d_{30} < 0{,}05mm$
					$d_{50} > 0{,}05mm$

Quadro A – 2. Continuação.

$d_{50} < O_{90} < d_{85}$ *					
A Areia Fina*	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$	B	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$
	2	$d_{10} \geq 0{,}075mm$		2	$d_{10} < 0{,}075mm$
	3*	$C_u \geq 6$		3	$I_P \leq 5$
	4*	$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$		4	$C_u \geq 6$
		$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$		5	$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$
		ou			$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$
		$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$			ou
		$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$			$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$
		ou			$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$
		$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$			ou
		$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$			$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$
	5*	$0{,}008mm < d_{10} < 0{,}03mm$			$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$
		$0{,}02mm < d_{30} < 0{,}14mm$		6	$0{,}008mm < d_{10} < 0{,}03mm$
		ou			$0{,}02mm < d_{30} < 0{,}14mm$
		$0{,}008mm < d_{10} < 0{,}03mm$			ou
		$0{,}04mm < d_{50} < 0{,}25mm$			$0{,}008mm < d_{10} < 0{,}03mm$
		ou			$0{,}04mm < d_{50} < 0{,}25mm$
		$0{,}002mm < d_{30} < 0{,}14mm$			ou
		$0{,}04mm < d_{50} < 0{,}25mm$			$0{,}002mm < d_{30} < 0{,}14mm$
	6*	$d_{30} > 0{,}05mm$			$0{,}04mm < d_{50} < 0{,}25mm$
		$d_{50} > 0{,}05mm$		7	$d_{30} > 0{,}05mm$
					$d_{50} > 0{,}05mm$

Quadro A – 2. Continuação.

O_{90} = 1*mm* *					
A Areia Fina*	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$	B	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$
	2	$d_{10} \geq 0{,}075mm$		2	$d_{10} < 0{,}075mm$
	3*	$C_u \geq 6$		3	$I_P \leq 5$
	4*	$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$		4	$C_u \geq 6$
		$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$		5	$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$
		ou			$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$
		$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$			ou
		$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$			$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$
		ou			$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$
		$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$			ou
		$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$			$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$
	5*	$0{,}008mm \geq d_{10} \geq 0{,}03mm$			$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$
		$0{,}02mm \geq d_{30} \geq 0{,}14mm$		6	$0{,}008mm \geq d_{10} \geq 0{,}03mm$
		ou			$0{,}02mm \geq d_{30} \geq 0{,}14mm$
		$0{,}008mm \geq d_{10} \geq 0{,}03mm$			ou
		$0{,}04mm \geq d_{50} \geq 0{,}25mm$			$0{,}008mm \geq d_{10} \geq 0{,}03mm$
		ou			$0{,}04mm \geq d_{50} \geq 0{,}25mm$
		$0{,}002mm \geq d_{30} \geq 0{,}14mm$			ou
		$0{,}04mm \geq d_{50} \geq 0{,}25mm$			$0{,}002mm \geq d_{30} \geq 0{,}14mm$
	6*	$d_{30} > 1mm$			$0{,}04mm \geq d_{50} \geq 0{,}25mm$
		$d_{50} > 1mm$		7	$d_{30} > 1mm$
					$d_{50} > 1mm$

Quadro A – 2. Continuação.

$d_{30} < O_{90} < 1mm$ *					
A Areia Fina*	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$	B	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$
	2	$d_{10} \geq 0{,}075mm$		2	$d_{10} < 0{,}075mm$
	3*	$C_u \geq 6$		3	$I_P \leq 5$
	4*	$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$		4	$C_u \geq 6$
		$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$		5	$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$
		ou			$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$
		$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$			ou
		$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$			$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$
		ou			$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$
		$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$			ou
		$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$			$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$
	5*	$0{,}008mm \geq d_{10} \geq 0{,}03mm$			$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$
		$0{,}02mm \geq d_{30} \geq 0{,}14mm$		6	$0{,}008mm \geq d_{10} \geq 0{,}03mm$
		ou			$0{,}02mm \geq d_{30} \geq 0{,}14mm$
		$0{,}008mm \geq d_{10} \geq 0{,}03mm$			ou
		$0{,}04mm \geq d_{50} \geq 0{,}25mm$			$0{,}008mm \geq d_{10} \geq 0{,}03mm$
		ou			$0{,}04mm \geq d_{50} \geq 0{,}25mm$
		$0{,}002mm \geq d_{30} \geq 0{,}14mm$			ou
		$0{,}04mm \geq d_{50} \geq 0{,}25mm$			$0{,}002mm \geq d_{30} \geq 0{,}14mm$
	6*	$d_{30} < 1mm$			$0{,}04mm \geq d_{50} \geq 0{,}25mm$
		$d_{50} > 1mm$		7	$d_{30} < 1mm$
					$d_{50} > 1mm$

Quadro A – 2. Continuação.

$d_{30} < O_{90} < d_{50}$ *					
A Areia Fina*	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$	B	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$
	2	$d_{10} \geq 0{,}075mm$		2	$d_{10} < 0{,}075mm$
	3*	$C_u \geq 6$		3	$I_P \leq 5$
	4*	$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$		4	$C_u \geq 6$
		$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$		5	$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$
		ou			$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$
		$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$			ou
		$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$			$0{,}001mm \geq d_{10} \geq 0{,}008mm$
		ou			$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$
		$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$			ou
		$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$			$0{,}004mm \geq d_{30} \geq 0{,}02mm$
	5*	$0{,}008mm \geq d_{10} \geq 0{,}03mm$			$0{,}007mm \geq d_{50} \geq 0{,}04mm$
		$0{,}02mm \geq d_{30} \geq 0{,}14mm$		6	$0{,}008mm \geq d_{10} \geq 0{,}03mm$
		ou			$0{,}02mm \geq d_{30} \geq 0{,}14mm$
		$0{,}008mm \geq d_{10} \geq 0{,}03mm$			ou
		$0{,}04mm \geq d_{50} \geq 0{,}25mm$			$0{,}008mm \geq d_{10} \geq 0{,}03mm$
		ou			$0{,}04mm \geq d_{50} \geq 0{,}25mm$
		$0{,}002mm \geq d_{30} \geq 0{,}14mm$			ou
		$0{,}04mm \geq d_{50} \geq 0{,}25mm$			$0{,}002mm \geq d_{30} \geq 0{,}14mm$
	6*	$d_{30} < 1mm$			$0{,}04mm \geq d_{50} \geq 0{,}25mm$
		$d_{50} < 1mm$		7	$d_{30} < 1mm$
					$d_{50} < 1mm$

Quadro A – 2. Continuação.

Necessidade de camada de *Areia Fina*		
A	1	$d_{20} < 0{,}002mm$
	2	D > 50%
B	1	$d_{20} \geq 0{,}002mm$
	2	$d_{10} < 0{,}075mm$
	3	$I_P > 5$
	4	D > 50%

Quadro A - 3. Normas de ensaios para propriedades principais.

	Propriedades	Norma do Ensaio	Objectivo do Ensaio
PRINCIPAIS	Compressibilidade (espessura)	EN ISO 13432: 2000	Determinar a resistência à fluência em compressão.
		ISO 9863: 2005	Determinação da espessura para pressões especificadas.
		ASTM D5199 (2006)	Medição da espessura nominal de um geossintético.
	Dimensão Característica dos Poros	EN ISO 12956: 1999	Determinação da dimensão característica da abertura (O_{90}).
		ASTM D4751 (2004)	Determinação da abertura aparente do geotêxtil (AOS ou O_{95}).
	Permeabilidade (Permissividade)	EN ISO 12958: 2010	Determinação da capacidade de fluxo de água normal ao plano.
		ASTM D4716 (2008)	
		EN ISO 11058: 2010	Determinação das características de permeabilidade à água normal ao plano, sem carga.
		ASTM D4491 (2009)	Determinar a permeabilidade à água do geotêxtil por permissividade.
	Resistência ao punçoamento	EN ISO 13433: 2006	Determinar a resistência ao punçoamento dinâmico.
		ASTM D256 (2010)	Determinação da resistência de plásticos por impacto do pêndulo isod.
		EN ISO 12236: 2006	Determinar a resistência ao punçoamento estático.
		ASTM D4833 (2007)	Determinar a resistência à perfuração de geotêxteis.
	Danificação Durante Instalação	ISO 13437: 1998	Método para instalar e extrair amostras do solo, testar amostras em laboratório.
		EN ISO 13428: 2005	Determinação da eficiência de protecção de um geossintético contra danos causados por impactos.
		EN 14151: 2010	Determinação de resistência ao "burst".
		ASTM D3786 (2009)	

Quadro A - 4. Normas de ensaios para propriedades secundárias.

	Propriedades	Norma do Ensaio	Objectivo do Ensaio
SECUNDARIAS	Durabilidade	EN 12226: 2000	Avaliar o geossintético após ensaios de durabilidade.
		ASTM D5819 (2005)	
		EN 12224: 2000	Determinação de resistência à degradação aos agentes atmosféricos.
		ASTM D1435 (2005)	
		EN 14030: 2001	Determinação da resistência a líquidos ácido e líquidos alcalinos.
		ASTM D543 (2006)	Determinar a resistência de plásticos a agentes químicos.
		EN ISO 13438: 2004	Determinação da resistência à oxidação.
		ASTM D794 (1993)	Determinação da resistência à oxidação a altas temperaturas.
		EN 12447: 2001	Determinar a resistência à hidrólise em água.
		EN 12225: 2000	Determinação da resistência microbiológica.
	Resistência a Tracção	EN ISO 10319: 2008	Determinar a resistência à tracção.
		ASTM D4595 (2009)	Propriedades de tracção de geotêxteis.
		EN ISO 13431: 1999	Determinar a fluência e rotura em fluência (em tracção).
		ASTM D5262 (2007)	Avaliar o comportamento do geossintético sujeito à tracção por fluência não confinada e rotura em fluência.
	Outros	ISO 13427:1998	Determinar a resistência à abrasão.
		ASTM D4886 (2010)	
		EN 965: 1995	Determinação de massa por unidade de área.
		ASTM D5261 (2009)	
		EN ISO 10722: 2007	Avaliação de danos causado por material granular.
		ASTM D5101 (2006)	Medição de colmatação do sistema geotêxtil-solo através da razão do gradiente hidráulico.
		EN 13738: 2004	Determinação de resistência ao arranque.

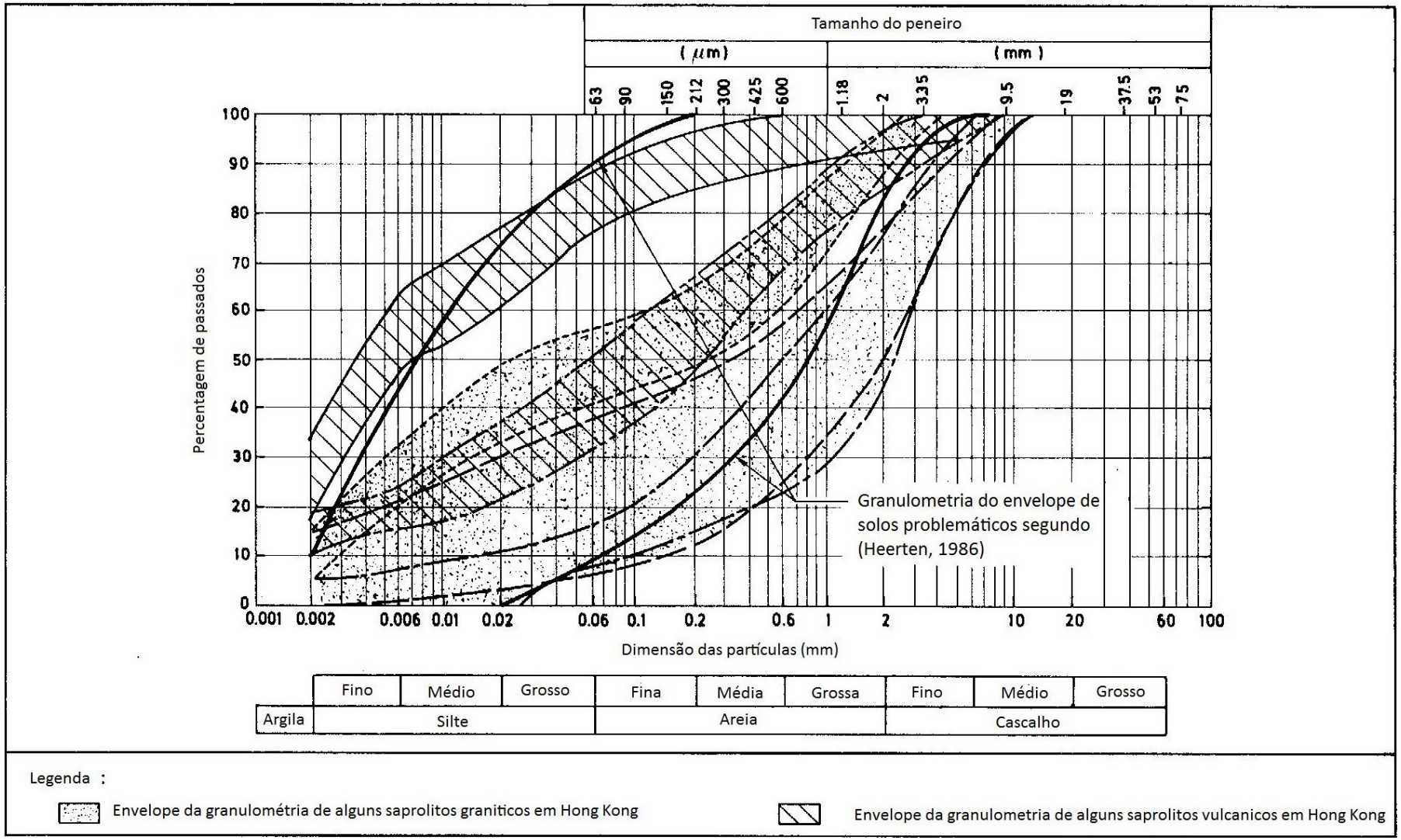


Figura A - 3. Exemplo de um envelope de solos problemáticos segundo Heerten (1986) e adaptado por G.E.O.H.K. (1993).

Quadro A - 5. Critérios de dimensionamento para filtro granulares.

Método	Coeficiente de Uniformidade, C_u		Critério de Filtro				Comentários
	Solo Base	Filtro	D_{15}/d_{85}	D_{15}/d_{15}	D_{15}/d_{50}	D_{50}/d_{50}	
Terzaghi (1922)	—	—	≤ 4	≥ 4	—	—	Critério baseado em experiência
Bertram (1940)	≤ 1,2	≤ 1,2	≤ 6,5	≤ 9	—	—	$8 \leq i_S \leq 20$
USCE (1953)	1,2 – 6,1	2 - 23	≤ 5	≤ 20	≤ 25	—	$1 \leq i_S \leq 26$
	≤ 1,5	2 - 23	≤ 6	≤ 20	≤ 25	—	
	≤ 4	2 - 23	≤ 5	≤ 40	≤ 25	—	
USBR (1955)	1,4 – 7	1,2 – 1,4	—	—	—	5 – 10	Filtros uniformes; Requerimentos adicionais: (1) $D_{100} < 75mm$ (2) Granulometria semelhante entre o solo base e o filtro. (3) Solo base para partículas menores que 4,76mm.
	7 - 25	5 - 30	—	12 – 40	—	12 – 58	Filtros graduados
	—	—	—	6 - 18	—	9 - 30	Filtros de brita
Sherard *et al* (1984)	< 5	1,1 – 4,4	< 5	—	—	—	Nenhuma quantidade significativa de partículas finas (< 0,075*mm*) no filtro.
	Bem graduado	1,1 – 4,4	< 9	—	—	—	Granulometria do solo base e do filtro não necessitam de ser semelhantes.
GEOHK (1993)	4 - 20	—	< 5	> 5	—	—	Filtro não deve ser mal graduado. $D_5 \leq 0{,}063mm$ $D_{100} \leq 50mm$
Giroud (2010)	≤ 3	—	$\leq C_u^{0,3}$	≥ 4	—	—	$I_D \leq 35\%$ (solto)
			$\leq 1{,}5 \cdot C_u^{0,3}$	≥ 4	—	—	$35\% < I_D < 65\%$ (medianamente denso)
			$\leq 2 \cdot C_u^{0,3}$	≥ 4	—	—	$I_D \geq 65\%$ (denso)
	≥ 3	—	$\leq 9/C_u^{1,7}$	≥ 4	—	—	$I_D \leq 35\%$ (solto)
			$\leq 13{,}5/C_u^{1,7}$	≥ 4	—	—	$35\% < I_D < 65\%$ (medianamente denso)
			$\leq 18/C_u^{1,7}$	≥ 4	—	—	$I_D \geq 65\%$ (denso)

Legenda:
D_m A dimensão do peneiro (em mm) que permite passar m% pelo peso do material do filtro
d_m A dimensão do peneiro (em mm) que permite passar m% pelo peso do material do solo base
C_u Coeficiente de Uniformidade ($C_u = D_{60}/D_{10}$)
i_S Gradiente Hidráulico
I_D Índice de compacidade do solo base (%)

Quadro A - 6. Critério de filtro dado por GSSMFE (1986).

	Critério de Retenção	Critério de Permeabilidade
German Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (GSSMFE 1986)	• Para solos com granulação de variação A, i.e. solos com ≥ 40% passados 0,06mm: $D_W < 10 \cdot d_{50}$ mas para 'solos problemáticos' dentro do envelope: $D_W < 10 \cdot d_{50}$ e $D_W < d_{90}$ e para solos com 'coesão estável': $D_W < 2 \cdot d_{90}$ • Para solos com granulação de variação B, i.e. solos com < 15% passados 0,06mm: $D_W < 5\sqrt{C_u} \cdot d_{50}$ e $D_W < 2 \cdot d_{90}$ mas para 'solos problemáticos' dentro do envelope: $D_W < \sqrt{C_u} \cdot d_{50}$ e $D_W < d_{90}$ • Para solos com granulação de variação C, i.e. solos com granulação misturada, utilizar critério para solos de variação B:	$k_n \geq 50k$

Legenda:

D_W Dimensão de abertura obtido por peneiração (molhado) usando equipamentos modificados de peneiros vibratórios e uma areia bem graduada.

d_m Dimensão do peneiro (em *mm*) que permite m% de passagem do solo.

C_u Coeficiente de uniformidade do solo (= d_{60}/d_{10})

k Coeficiente de permeabilidade do solo.

k_n Coeficiente de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil.

Notas:

(1) O critério de $D_W < 2 \cdot d_{90}$ deve ser aplicado apenas se as propriedades coesivos do solo base são absolutamente preservados mesmo sujeitos a carga.

(2) O envelope que define os solos problemáticos é determinado através de estudos específicos do local de obra.

Quadro A - 7. Critério de filtro dado por FCGG (1989).

	Critério de Retenção	Critério de Permeabilidade
French Committee on Geotextiles and Geomembranes (CFGG 1989)	**$O_{95} < C_g \times d_{85}$** Onde: $C_g = C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4$ C_1 = 1,00 para solos bem graduados e contínuos = 0,80 para solos uniformes e contínuos ($C_u < 4$) C_2 = 1,25 para Solos densos ($I_D \geq 65\%$) e confinados = 0,80 para solos soltos ($I_D < 65\%$) e não confinados C_3 = 1,00 para gradientes hidráulicos, $i < 5$ = 0,80 para gradiente hidráulico, $5 < i < 20$ = 0,60 para gradiente hidráulico, $20 < i < 40$ ou fluxo variável C_4 = 1,00 para uso somente de filtragem = 0,30 para uso de filtragem e drenagem • Para solos 'finos', i.e. solos com o valor de $C_g\ d_{85}$ menos que 0,05*mm*, pode-se assumir, **O_{95} = 0,05*mm***. • Para 'solos problemáticos', i.e. solos que contêm finos que podem entrar facilmente em suspensão (e.g. areia com baixo conteúdo em argila), **$4 \cdot d_{15} < O_{95} < C_g \times d_{85}$** • Para granulometria descontinua, usar apenas a curva granulométrica da fracção fina para dimensionamento.	**$\psi > A_g \times k$** • Para estruturas normais (taludes, valas de drenagem) onde tem gradientes baixos e solos de permeabilidade baixa: **$\psi > 10^4 \cdot k$** • Para estruturas de risco elevado (barragens de terra) onde os gradientes são elevados: **$\psi > 10^5 \cdot k$** • Para solos limpos com gradientes baixos (areias limpas com d_{12} < 0,08*mm*): **$\psi > 10^3 \cdot k$**

Legenda:

O_m	Dimensão de abertura do geotêxtil no qual *m* representa a percentagem de passados retidos após processo de peneiração.	C_u	Coeficiente de uniformidade do solo (= d_{60}/d_{10})
d_m	Dimensão do peneiro (em *mm*) que permite m% de passagem do solo.	k_n	Coeficiente de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil
ψ	Permissividade do geotêxtil (=kn/tg(s-1), onde tg é a espessura do geotêxtil).	k	Coeficiente de permeabilidade do solo.

Notas:

(1) Para solos potencialmente dispersivos, recomenda-se ensaios de filtragem ao longo prazo.

(2) Critérios baseados neste método devem ser usados para geotêxteis agulhados não tecidos e espessos.

Quadro A - 8. Critério de filtro dado por FHWA (1998).

	Critério de Retenção	Critério de Permeabilidade
Federal Highway Administration (FHWA 1998)	**AOS ou $O_{95} \leq B \cdot d_{85}$** • Fluxo Estático: · Para solos com ≤ 50% passados no peneiro nº200 (ASTM), B = 1 para $C_u \leq 2$ ou $C_u \geq 8$ B = $0{,}5 \cdot C_u$ para $2 < C_u \leq 4$ B = $8/C_u$ para $4 < C_u < 8$ · Para solos com > 50% passados no peneiro nº200 (ASTM), B = 1 para tecidos B = 1,8 para não tecidos e para ambos, AOS ou $O_{95} \leq 0{,}3mm$ • Fluxo Dinâmico: B = 0,5	• Para aplicações menos críticas e condições menos severas: **$k_n \geq k$** • Para aplicações críticas e condições severas: **$k_n \geq 10k$** Recomenda-se o critério de desempenho para os ensaios de filtragem: *Razão do gradiente*(1) ≤ 3 Alternativamente utilizar uma lista aprovada de especificações.
	Critério de Colmatação	**Critério de Permissividade**
	• Para aplicações menos críticas e condições menos severas: **$O_{95} \geq 3 \cdot d_{15}$** para $C_u > 3$ 1. Percentagem de área de aberturas ≥ 4% para tecidos; 2. Porosidade ≥ 50% para não tecidos. • Para aplicações críticas e condições severas deve-se realizar ensaios de filtragem para verificar resistência á colmatação.	$\psi \geq 0{,}5 sec^{-1}$ para $d_{15} \leq 0{,}075mm$ $\psi \geq 0{,}2 sec^{-1}$ para $d_{15} > 0{,}075mm \geq d_{50}$ $\psi \geq 0{,}1 sec^{-1}$ para $d_{50} > 0{,}075mm$

Legenda:

O_m	Dimensão de abertura do geotêxtil no qual *m* representa a percentagem de passados retidos após processo de peneiração.	AOS	Dimensão de abertura aparente.
d_m	Dimensão do peneiro (em *mm*) que permite m% de passagem do solo.	C_u	Coeficiente de uniformidade do solo (= d_{60}/d_{10})
ψ	Permissividade do geotêxtil (=$k_n/t_g(s^{-1})$, onde t_g é a espessura do geotêxtil).	k	Coeficiente de permeabilidade do solo.
		k_n	Coeficiente de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil.

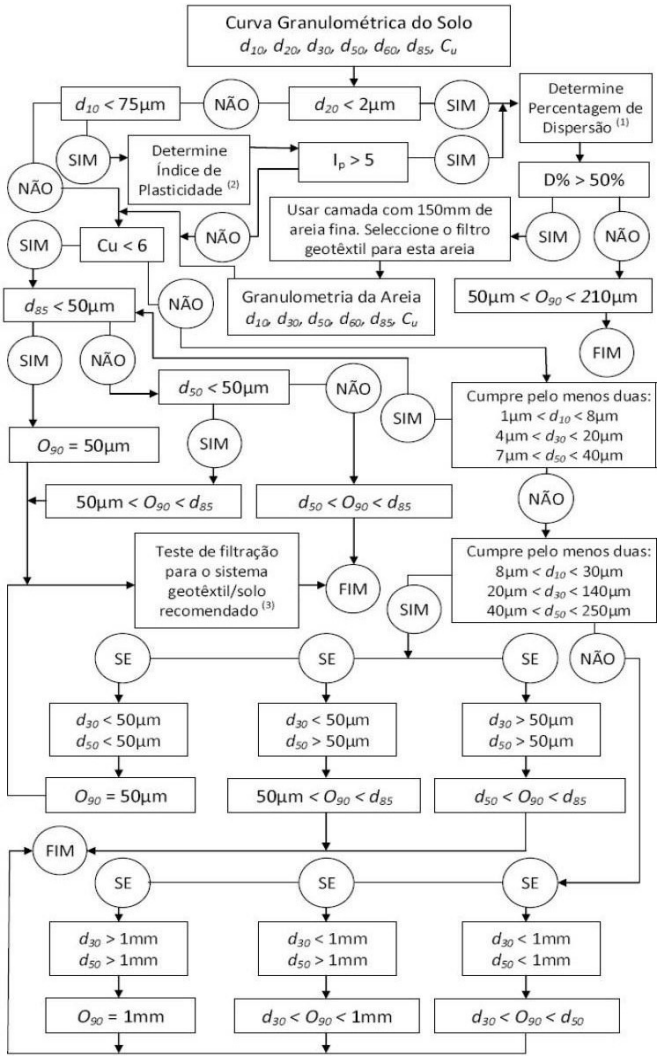
Notas:

(1) A razão do gradiente é definida como:

$$\frac{\text{Gradiente hidráulico sobre o geotêxtil e nos primeiros 25mm de solo adjacente deste}}{\text{gradiente hidráulico acima dos 50mm seguidas de solo (i.e. 25 a 75mm acima do geotêxtil)}}$$

(2) O geotêxtil deve ser especificado com a dimensão máxima de abertura pelo critério da retenção.

Quadro A - 9. Critério de filtro para fluxo unidireccional dado por Mlynarek (1998).

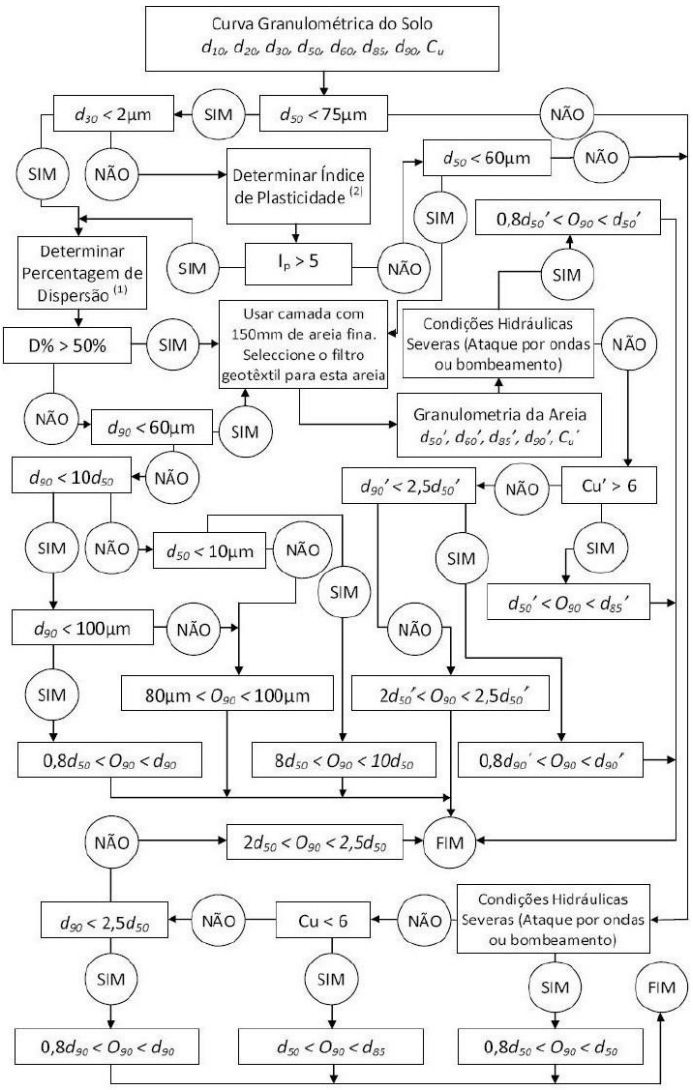
	Fluxo Unidireccional	
	Critério de Retenção e Colmatação	Critério de Permeabilidade
Mlynarek (1998)		• Para estruturas de risco reduzido (valas usuais): **$k_n \geq 10k$** • Para estruturas com algum risco (dreno de pé em barragens): **$k_n \geq 20k$** • Para estruturas de risco elevado (núcleos argilosos em barragens): **$k_n \geq 100k$**

Legenda:

d_m	Dimensão do peneiro (em *mm*) que permite m% de passagem do solo.	I_P	Índice de plasticidade do solo.
O_m	Dimensão de abertura do geotêxtil no qual *m* representa a percentagem de passados retidos após processo de peneiração.	k	Coeficiente de permeabilidade do solo.
C_u	Coeficiente de uniformidade do solo (= d_{60}/d_{10})	k_n	Coeficiente de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil.
D%	Dispersão do solo base.		

Notas: (1) ASTM D4221 (2) ASTM D4318 (3) Método SAGEOS GX003

Quadro A - 10. Critério de filtro para fluxo bidireccional dado por Mlynarek (1998).

	Fluxo Bidireccional	
	Critério de Retenção e Colmatação	Critério de Permeabilidade
Mlynarek (1998)		• Para estruturas de risco reduzido (valas usuais): **$k_n \geq 10k$** • Para estruturas com algum risco (dreno de pé em barragens): **$k_n \geq 20k$** • Para estruturas de risco elevado (núcleos argilosos em barragens): **$k_n \geq 100k$**

Legenda:

d_m	Dimensão do peneiro (em *mm*) que permite m% de passagem do solo.	I_P	Índice de plasticidade do solo.
O_m	Dimensão de abertura do geotêxtil no qual *m* representa a percentagem de passados retidos após processo de peneiração.	k	Coeficiente de permeabilidade do solo.
C_u	Coeficiente de uniformidade do solo (= d_{60}/d_{10})	k_n	Coeficiente de permeabilidade normal ao plano do geotêxtil.
D%	Dispersão do solo base.		

Notas: (1) ASTM D4221 (2) ASTM D4318

Quadro A - 11. Critério de dimensionamento de filtro dado por Giroud (2010).

Giroud (2010)

Dimensionamento

Critério de Retenção

• Para o caso em que as partículas coesivas formam espaços vazios que captam outras partículas:

$\mathbf{C_u \leq 3}$

Solo solto ($I_D \leq 35\%$):

$$O_f \leq C_u^{0,3} \cdot d_{85}$$

Solo moderadamente denso ($35\% < I_D < 65\%$):

$$O_f \leq 1{,}5 C_u^{0,3} \cdot d_{85}$$

Solo denso ($I_D \geq 65\%$):

$$O_f \leq 2 C_u^{0,3} \cdot d_{85}$$

• Para o caso em que as partículas coesivas não contribuem a captação de outras partículas:

$\mathbf{C_u \geq 3}$

Solo solto ($I_D \leq 35\%$):

$$O_f \leq \frac{9 d_{85}}{(C_u)^{1,7}}$$

Solo moderadamente denso ($35\% < I_D < 65\%$):

$$O_f \leq \frac{13{,}5 d_{85}}{(C_u)^{1,7}}$$

Solo denso ($I_D \geq 65\%$):

$$O_f \leq \frac{18 d_{85}}{(C_u)^{1,7}}$$

Critério de Permeabilidade

$$\mathbf{k_f \geq \max(i_S k, k)}$$

• Verificação de pressão nos poros:

$$\mathbf{k_f \geq i_S \cdot k}$$

em que i_s pode tomar as seguintes valores:

Vala de drenagem	≤ 1
Drenos em muros verticais	1,5
Valas de estradas	≤ 1
Protecção de canais de água	≤ 1
Camada de drenagem de aterros	1,5
Dreno de pé em barragem	2
Dreno ao montante do núcleo argiloso em barragem	3 à > 10
Protecção costeira	10
Reservatórios de líquidos com camada de argila	> 10

• Verificação do grau de fluxo hidráulico:

$$\mathbf{k_f \geq k}$$

com espessura de 1 à 10*mm*

Legenda:

d_m	Dimensão do peneiro (em *mm*) que permite m% de passagem do solo.	I_D	Índice de compacidade do solo.
O_f	Dimensão de abertura do filtro geotêxtil.	k	Coeficiente de permeabilidade do solo.
C_u	Coeficiente de uniformidade do solo (= d_{60}/d_{10})	k_f	Coeficiente de permeabilidade do filtro geotêxtil.

Notas:

(1) Este critério utiliza os valores obtidos através da linearidade da parte central da curva granulométrica.

(2) Considere as piores condições possíveis, ou seja, para condições severas e aplicações críticas.

Quadro A - 12. Critério de verificação de um filtro dado por Giroud (2010).

	Verificação	
	Critério de Porosidade	Critério de Espessura
Giroud (2010)	Determinação do número de aberturas por unidade de área (N_o): • Para um filtro de geotêxtil tecido: $$\frac{0,1}{O_f^2} \leq N_o = \frac{A_R}{O_f^2}$$ $\mathbf{A_R \geq 0,1}$ • Para um filtro de geotêxtil não tecido: $$\frac{\left(1-\sqrt{1-n}\right)^2}{O_f^2} \leq N_o \leq \frac{4\left(1+0,4n-\sqrt{1-n}\right)^2}{\sqrt{3}O_f^2}$$ $\boldsymbol{n \geq 0,55}$	Verificação da dimensão de abertura do filtro geotêxtil: $\mathbf{O_f \leq O_f}$ ***do dimensionamento*** • Quando é conhecido a espessura (t_{GTX}): $$O_f = \left(\left(\frac{1}{\sqrt{1-n}}-1\right)+\frac{10n}{(1-n)t_{GTX}/d_f}\right)d_f$$ • Quando é desconhecido a espessura mas conhecido a massa por unidade de área (μ_{GTX}): $$O_f = \left(\left(\frac{1}{\sqrt{1-n}}-1\right)+\frac{10n}{\mu_{GTX}/\rho_f d_f}\right)d_f$$ Determinação de número de constrições para um filtro geotêxtil não tecido: $\mathbf{N_{constrições} \geq 25}$ • Quando é conhecido a espessura do geotêxtil: $$N_{constrições} \approx \frac{(1-n)t_{GTX}}{d_f\sqrt{1-n}}$$ • Quando é desconhecido a espessura mas conhecido a massa por unidade de área: $$N_{constrições} \approx \frac{\mu_{GTX}}{\rho_f d_f\sqrt{1-n}}$$

Legenda:

- O_f Dimensão de abertura do filtro geotêxtil.
- n Porosidade do geotêxtil $n = 1-\frac{u_{GTX}}{\rho_f t_{GTX}}$
- A_R Relativa área aberta (área aberta/área total).
- d_f Diâmetro da fibra.
- ρ_f Massa volúmica do material da fibra.

Notas:

(1) É necessário conhecer as características do geotêxtil para efectuar a verificação.

(2) A verificação de espessura é apenas necessário para geotêxteis não tecidos.

Quadro A - 13. Exemplo 1 de Mlynarek (1998b).

Passo	Procedimento	Resultado
Modelo	Tipo de obra	Drenagem Agricóla
1	Determinação do fluxo	Aplicar critério de fluxo unidireccional
2	Determinação da graduação do solo	Siltes d_{10} = 0,0015; d_{20} = 0,0032; d_{30} = 0,006; d_{50} = 0,012; d_{60} = 0,015; d_{85} = 0,033; C_u = 10
3	d_{20} < 0,002mm	Não
4	d_{10} < 0,075mm	Sim
5	Determinar índice de plasticidade	I_P = 4
6	I_P >5	Não
7	C_u < 6	Não
	Cumpre pelos menos duas: 0,001mm < d_{10} < 0,008mm 0,004mm < d_{30} < 0,02mm 0,007mm < d50 < 0,04mm	Sim
9	d_{85} < 0,05mm	Sim
11	Decisão: O_{90} = 0,05mm	O_{90} = 0,05mm *ensaios de filtragem

Quadro A - 14. Exemplo 2 de Mlynarek (1998b).

Passo	Procedimento	Resultado
Modelo	Tipo de obra	Protecção de barragem
1	Determinação do fluxo	Aplicar critério de fluxo bidireccional
2	Determinação da graduação do solo	Siltes d_{10} = 0,0015; d_{20} = 0,0032; d_{30} = 0,006; d_{50} = 0,012; d_{60} = 0,015; d_{85} = 0,033; d_{90} = 0,038; C_u = 10
3	d_{50} < 0,075mm	Sim
4	d_{30} < 0,002mm	Não
5	Determinar índice de plasticidade	I_P = 4
6	I_P >5	Não
7	d_{50} < 0,06mm	Sim
8	Decisão	Necessidade de uma camada de 150mm de areia fina. Dimensionar geotêxtil.
9	Determinação da granulometria da areia	d_{10} = 0,08; d_{50} = 0,135; d_{60} = 0,155; d_{85} = 0,25; d_{90} = 0,29; C_u = 1,9
10	Condições hidráulicas severas	Sim
11	Decisão: 0,8 d_{50} < O_{95} < d_{50}	0,108mm < O_{95} < 0,135mm

Quadro A - 15. Exemplo 3 de Mlynarek (1998b).

Passo	Procedimento	Resultado
Modelo	Tipo de obra	Vala de auto-estrada
1	Determinação do fluxo	Aplicar critério de fluxo bidireccional
2	Determinação da graduação do solo	Areia siltoso d_{10} = 0,02; d_{20} = 0,05; d_{30} = 0,085; d_{50} = 0,2; d_{60} = 0,32; d_{85} = 2,6; d_{90} = 5; C_u = 15
3	d_{50} < 0,075mm	Não
4	Condições hidráulicas severas	Não
5	C_u < 6	Não
6	d_{90} < 2,5 d_{50}	Não
7	Decisão: 2 d_{50} < O_{95} < 2,5 d_{50}	0,4mm < O_{95} < 0,5mm

Quadro A - 16. Exemplo 4 de Mlynarek (1998b).

Passo	Procedimento	Resultado
1	Determinação do fluxo	Aplicar critério de fluxo unidireccional
2	Determinação da graduação do solo	Silte arenoso d_{10} = 0,009; d_{20} = 0,014; d_{30} = 0,02; d_{50} = 0,035; d_{60} = 0,05; d_{85} = 0,1; C_u = 5,6
3	d_{20} < 0,002mm	Não
4	d_{10} < 0,075mm	Sim
5	Determinar índice de plasticidade	I_P = 3
6	I_P >5	Não
7	C_u < 6	Sim
8	d_{85} < 0,05mm	Não
9	d_{50} < 0,05mm	Sim
10	Decisão: 0,05mm < O_{95} < d_{85}	0,05mm < O_{95} < 0,1mm

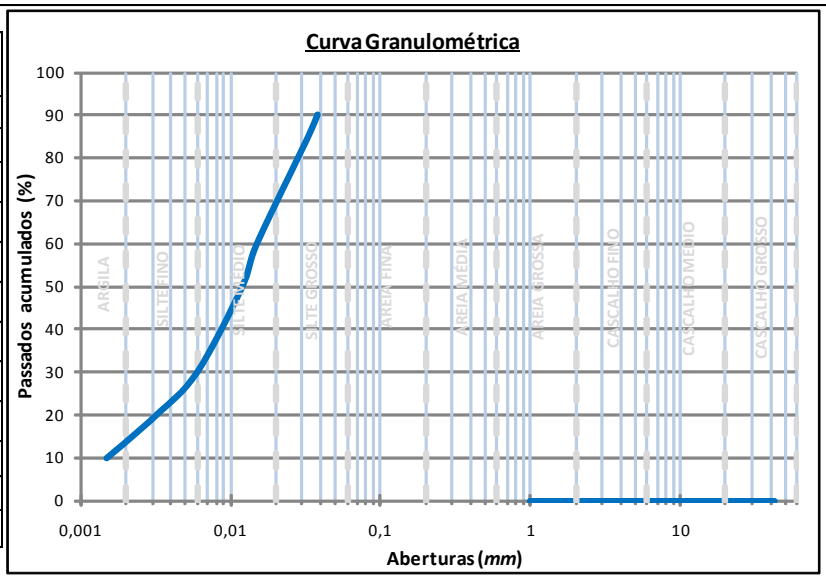
Nome:	*Exemplo 2 Mlynarek*	**Data:**	

Local de Obra:			
Tipo de Obra:	*Protecção de barragem*		
Nível de Risco:	*Algum*	**Função de Filtro:**	*NN*

Condições Hidráulicas	*Condições severas/críticas, sujeito à ondulação e escoamento turbulento. Com Fluxo Bidireccional*	
	Gradiente Hidráulico (*i*):	*NN*

Solo Base

Dimensão das partículas	
Designação	***mm***
d_5	NN
d_{10}	0,0015
d_{12}	NN
d_{15}	NN
d_{20}	0,0032
d_{30}	0,006
d_{40}	NN
d_{50}	0,012
d_{60}	0,015
d_{85}	0,033
d_{90}	0,038



Coeficiente de uniformidade C_u:	10	**Coeficiente de permeabilidade k_S(m/s):**	0,00001
Porosidade do solo *n*:	NN	**Índice de compacidade I_D (%):**	NN
Dispersão do solo *D (%)*:	65	**Índice de plasticidade I_P:**	4
Tipo de solo:	*Granulometria Contínua. Não é um solo problemático. Não sabe, considere-se não coesivo.*		

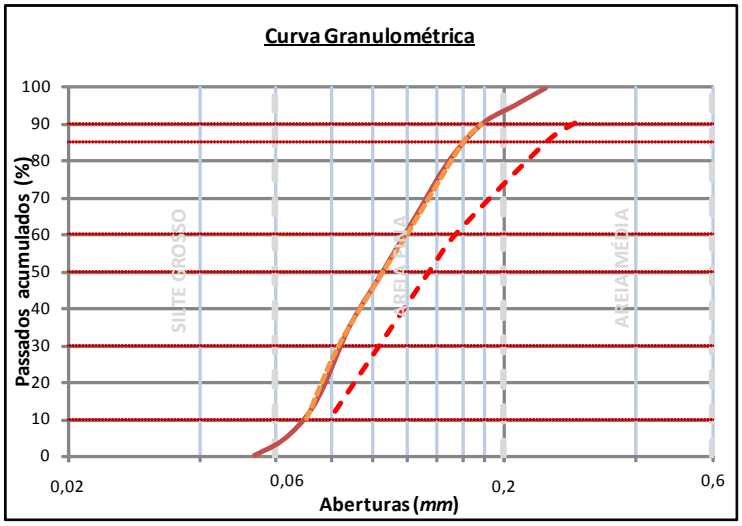
Tipo de Dimensionamento:		*Normal.*
Métodos	**Filtros Granulares:** Granular	*Não foi realizado o dimensionamento de um filtro granular.*
	Filtros Geotêxteis: Geotêxtil	*Mlynarek (1998) |*

Figura A - 4. Folha 1 de dados do exemplo de Mlynarek.

Definições de Areia Fina

Peneiração/Sedimentação		
Designação do peneiro	Abertura (mm)	% Passados Acumulados
No. 60	0,25	
No. 70	0,21	
No. 80	0,177	
No. 100	0,149	
No. 120	0,125	
No. 140	0,105	
No. 170	0,088	
No. 200	0,074	
No. 230	0,063	
No. 270	0,053	

O método de Mlynarek (1998) verificou uma necessidade de utilizar uma camada de areia fina com 150mm de espessura.



Dimensão	*mm*
d_{10}'	0,08
d_{30}'	
d_{50}'	0,135
d_{60}'	0,155
d_{85}'	0,25
d_{90}'	0,29

C_u'	1,94
k'	0,0001

Figura A - 5. Folha 2 de dados do Exemplo 2 de Mlynarek (1998b).

Quadro A - 17. Critério de Sobrevivência de um filtro em geotêxtil segundo F.H.W.A. (1998).

			Classe do geotêxtil					
			Classe 1		Classe 2		Classe 3	
			Extensão		Extensão		Extensão	
Propriedade	**Ensaio**	**Unidade**	**<50%**	**≥50%**	**<50%**	**≥50%**	**<50%**	**≥50%**
Resistência "grab"	ASTM D 4632	N	1400	900	1100	700	800	500
Resistência das costuras	ASTM D 4632	N	1260	810	990	630	720	450
Resistência ao rasgamento	ASTM D 4533	N	500	350	400	250	300	180
Resistência ao punçoamento	ASTM D 4833	N	500	350	400	250	300	180
Resistência ao rebentamento	ASTM D 3786	kPa	3500	1700	2700	1300	2100	950

			Exigências Solo: percentagem de material com dimensão inferior a 0,075mm		
Propriedade	**Ensaio**	**Unidade**	< 15	15 a 50	> 50
Classe do geotêxtil			Classe 2		
Permissividade	ASTM D 4991	s^{-1}	0,5	0,2	0,1
Dimensão aparente das aberturas	ASTM D 4751	mm	0,43 MARV	0,25 MARV	0,22 MARV
Estabilidade à radiação ultravioleta (resistência residual)	ASTM D 4355	%	50% após 500 horas de exposição		

e – medida de acordo com a ASTM D 4632

A resistência nas costuras só é utilizada quando relevante.

* - a resistência ao rasgamento para geotêxteis em monofilamento tecidos é de 250 N.

Quadro A - 18. Valores máximos, mínimos e médios dos resultados geotêxtil do Exercício 5.3.2

Mínimo	Médio	Máximo	Designação	Mínimo	Médio	Máximo
0,142	0,142	0,142	≤ O_f (mm) ≤	0,027	0,085	0,177
			k_f (ms^{-1}) ≥	1,00E-05	1,05E-04	2,00E-04
			ψ (sec^{-1}) ≥	0,01	0,255	0,5

Quadro A - 19. Valores percentuais do desvio da média para resultados geotêxtil.

Desvio (%)	Designação	Desvio (%)
0	≤ O_f (mm) ≤	108
	k_f (ms^{-1}) ≥	90
	ψ (sec^{-1}) ≥	96

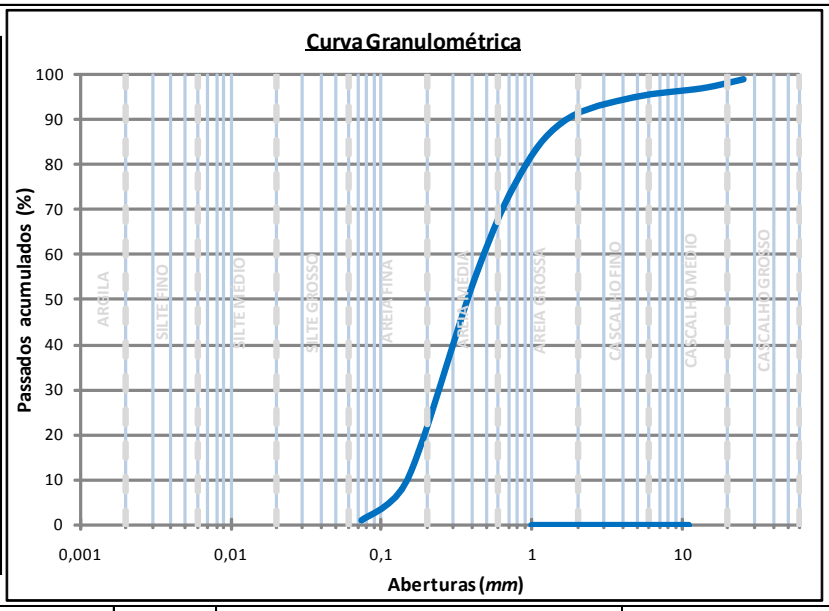
Nome:	*Exercício FHWA*	**Data:**	

Local de Obra:			
Tipo de Obra:	*Vala de drenagem|*		
Nível de Risco:	*Reduzido*	**Função de Filtro:**	*NN*

Condições Hidráulicas	*Condições menos severas/críticas, não sujeito á ondulação nem turbulências. NN*	
	Gradiente Hidráulico (*i*):	*NN*

Solo Base

Dimensão das partículas	
Designação	***mm***
d_5	NN
d_{10}	0,15
d_{12}	NN
d_{15}	0,15
d_{20}	NN
d_{30}	NN
d_{40}	NN
d_{50}	0,38
d_{60}	0,48
d_{85}	1
d_{90}	NN



Coeficiente de uniformidade C_u:	3,2	**Coeficiente de permeabilidade k_s(m/s):**	0,0002
Porosidade do solo *n*:	NN	**Índice de compacidade I_D *(%)*:**	NN
Dispersão do solo *D (%)*:	NN	**Índice de plasticidade I_P:**	NN
Tipo de solo:	*Granulometria Contínua. Não é um solo problemático. Não sabe, considere-se não coesivo.*		

Tipo de Dimensionamento:		*Não Conservativo.*
Métodos	**Filtros Granulares:** Granular	*Não foi realizado o dimensionamento de um filtro granular.*
	Filtros Geotêxteis: Geotêxtil	*Federal Highway Administration (FHWA 1998) |*

Figura A - 6. Folha 1 de dados relativo ao Exercício de F.H.W.A. (1998).

Durabilidade

Recomenda-se exigências para as propriedades relativas à resistência de geotêxteis (adaptado de ASSHTO M288-97):

			Classe do geotêxtil					
			Classe 1		Classe 2		Classe 3	
			Extensão		Extensão		Extensão	
Propriedade	**Ensaio**	**Unidade**	**<50%**	**≥50%**	**<50%**	**≥50%**	**<50%**	**≥50%**
Resistência "grab"	ASTM D 4632	N	1400	900	1100	700	800	500
Resistência das costuras	ASTM D 4632	N	1260	810	990	630	720	450
Resistência ao rasgamento	ASTM D 4533	N	500	350	400	250	300	180
Resistência ao punçoamento	ASTM D 4833	N	500	350	400	250	300	180
Resistência ao rebentamento	ASTM D 3786	kPa	3500	1700	2700	1300	2100	950

			Exigências		
			Solo: percentagem de material com dimensão inferior a 0,075mm		
Propriedade	**Ensaio**	**Unidade**	< 15	15 a 50	> 50
Classe do geotêxtil			Classe 2		
Permissividade	ASTM D 4991	s^{-1}	0,5	0,2	0,1
Dimensão aparente das aberturas	ASTM D 4751	mm	0,43 MARV	0,25 MARV	0,22 MARV
Estabilidade à radiação ultravioleta (resistência residual)	ASTM D 4355	%	50% após 500 horas de exposição		

e – medida de acordo com a ASTM D 4632

A resistência nas costuras só é utilizada quando relevante.

* - a resistência ao rasgamento para geotêxteis em monofilamento tecidos é de 250 N.

Figura A - 7. Folha 2 de "Resultados Geotêxtil". Exigências de resistência.

Factores de Redução

A resistência do geotêxtil relativo as agentes destrutivos pode ser garantido aplicando a seguinte equação:

$$T_{adm} = \frac{T_{ult}}{FR_{DDI} \times FR_{FLU} \times FR_{DQ} \times FR_{DB}}$$

Onde:

T_{adm} = Resistência á tracção admissível;
T_{ult} = Resistência á tracção ultimo;
FR_{DDI} = Factor de redução para danos durante instalação;
FR_{FLU} = Factor de redução para fluência;
FR_{DQ} = Factor de redução para a degradação química;
FR_{DB} = Factor de redução para a degradação biológica.

Onde estes valores são representados na tabela seguinte [Koerner (1999)]:

	Intervalo dos Factores de Redução			
Área de Aplicação	**Danos Durante Instalação**	**Fluência**	**Degradação Química**	**Degradação Biológica**
Separação	1,1 a 2,5	1,5 a 2,5	1,0 a 1,5	1,0 a 1,2
Amortecimento	1,1 a 2,0	1,2 a 1,5	1,0 a 2,0	1,0 a 1,2
Estradas não pavimentadas	1,1 a 2,0	1,5 a 2,5	1,0 a 1,5	1,0 a 1,2
Muros	1,1 a 2,0	2,0 a 4,0	1,0 a 1,5	1,0 a 1,3
Aterros	1,1 a 2,0	2,0 a 3,5	1,0 a 1,5	1,0 a 1,3
Reforço	1,1 a 2,0	2,0 a 4,0	1,0 a 1,5	1,0 a 1,3
Estabilidade de taludes	1,1 a 1,5	2,0 a 3,5	1,0 a 1,5	1,0 a 1,3
Sobreposição de pavimentos	1,1 a 1,5	1,0 a 2,0	1,0 a 1,5	1,0 a 1,1
Caminhos de ferro	1,5 a 3,0	1,0 a 1,5	1,5 a 2,0	1,0 a 1,2
Formas flexíveis	1,1 a 1,5	1,5 a 3,0	1,0 a 1,5	1,0 a 1,1
Envolvente de siltes	1,1 a 1,5	1,5 a 2,5	1,0 a 1,5	1,0 a 1,1

Figura A - 8. Folha 3 de "Resultados Geotêxtil", Factores de Redução.